

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

E.A.P. DE FÍSICA

**Estudio de los parámetros de calibración de activímetros
en medicina nuclear**

TESIS

para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

AUTOR

Alexander Jesús Cárdenas Solano

ASESOR

María Velasquez Campos

Lima – Perú

2006

RESUMEN

El presente trabajo de Tesis realizado en el Departamento de Medicina Nuclear en el Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas INEN, tiene como objetivo estudiar los diferentes parámetros de calibración de los Activímetros como: Precisión, exactitud, linealidad, estabilidad, sensibilidad y reproducibilidad ajustados debidamente con sus factores de calibración y factores de geometría, previamente hallados para cada fuente de referencia y radioisótopos más usados en el departamento.

Este estudio se realizó con el fin de poder garantizar la eficacia y confiabilidad del equipo al momento de medir la actividad del radioisótopo, ya que el incorrecto funcionamiento de un Activímetro conduce a la administración de dosis inexactas a las establecidas por cada estudio, sea de diagnóstico o tratamiento, atentando de esta manera contra la optimización de la Protección Radiológica en el personal ocupacionalmente expuesto y contra el paciente, provocando su sobre irradiación o una mala calidad de imagen que no permita determinar un buen diagnóstico.

Se utilizaron dos Activímetros con sus respectivas cámaras de ionización de tipo pozo: el Deluxe Isotope Calibrator II y el PTW-Freiburg Curiementor 3; con fuentes de referencia Cesio-137 y Bario-133 ; así como material radiactivo: Tc-99m, para los estudios de linealidad.

Se realizó el control de calidad de los Activímetros y con los datos obtenidos se calculó los factores de corrección (factor de calibración y geometría); luego se aplicaron los factores en cada estudio realizado, con la intención de hacer un ajuste en los datos que permitan un mejor resultado, es decir medidas de lecturas más cercanas a las de referencia.

Se obtuvieron resultados satisfactorios, con una exactitud hasta del 98 % de confiabilidad aplicando el factor de calibración y del 95 % de confiabilidad aplicando el factor de geometría para el estudio de las Pruebas de Referencia según la Prueba Estadística de Mann-Whitney, y una dispersión de datos dentro de los límites de aceptación de ± 5 % para ambos Activímetros para cada fuente de referencia para el estudio de las Pruebas de Verificaciones Operativas en condiciones de los radionúclidos más usados en Medicina Nuclear como el Tc-99m y el I-131.

AGRADECIMIENTO

Deseo brindar mi más sincero agradecimiento y reconocimiento a las personas e instituciones, por su ayuda y colaboración en el desarrollo y culminación de este trabajo de Tesis.

A la Mg. María Velásquez Campos por su constante apoyo y asesoría en el presente Trabajo de Tesis.

Al Lic. José F. Márquez Pachas por su constante co-asesoría en todo el desarrollo de este Trabajo de Tesis.

Al Dr. Walter Flores Vega por su apoyo en el inicio de este Trabajo de Tesis.

Al Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas, Departamento de Medicina Nuclear, por el apoyo brindado en el trabajo experimental de esta Tesis.

A la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas por haber impartido la formación y conocimientos para esta Tesis.

Y a todas aquellas personas que directa e indirectamente colaboraron con el desarrollo de este Trabajo.

A la memoria de
mis abuelos
Julio y Emiliano

Pensar para acertar, callar para
resistir, actuar para vencer.

INTRODUCCIÓN

La Medicina Nuclear es la especialidad médica que emplea los isótopos radiactivos, las radiaciones nucleares, las emisiones electromagnéticas de los núcleos atómicos y técnicas biofísicas afines para la prevención, diagnóstico y terapia de las enfermedades; así como la investigación médica, incluyendo el estudio de los fenómenos biológicos originados por la utilización de los isótopos radiactivos, así como el empleo de ciclotrones y reactores nucleares en la producción de radionucléidos de uso médico y la aplicación de sistemas de reconstrucción de imágenes y de elaboración de datos.

Los tres pilares en los que se fundamenta la Medicina Nuclear están constituidos por el paciente objeto de estudio, los radiofármacos o radiotrazadores (moléculas simples, macromoléculas y elementos puros que contienen átomos radiactivos) que, tras ser administrados a un paciente se distribuyen localizándose a nivel molecular, celular, tisular u orgánico y la instrumentación específica de la Medicina Nuclear. La instrumentación permite obtener, mediante detectores externos, la distribución temporal y espacial del radiofármaco administrado para estudiar la morfología y funcionamiento de diversos órganos. En terapia se aprovechan los efectos radiobiológicos del depósito selectivo de la radiación en las células que captan el radiofármaco, para tratar de destruirlas. Por tanto es necesario optimizar las dosis suministradas a los pacientes y garantizar el correcto funcionamiento de los equipos utilizados.

El Activímetro, también conocido como calibrador de dosis, es el instrumento básico para medir las actividades de los radiofármacos que han de administrarse a los pacientes, por lo que es imprescindible garantizar la fiabilidad de sus medidas. Su necesidad se impone cada vez más en los servicios de Medicina Nuclear, fundamentalmente porque los radionucléidos

usados con mayor frecuencia en estudios de diagnóstico, provienen de generadores.

Además, en el caso de los radiofármacos, es necesario determinar su actividad, puesto que la eficiencia de marcación no es siempre conocida. Se evalúan de esta manera las dosis suministradas a los pacientes en el lugar y momento de la aplicación, contribuyendo a la optimización de la protección de los pacientes procurando evitar que sean expuestos a dosis innecesarias.

Por lo antes expuesto, notamos la importancia del estudio de los parámetros que influyen en la calibración de los Activímetros ya que permite determinar los factores que pueden afectar el valor real de la dosis que sea necesario administrar al paciente para obtener una buena imagen en el marco de un procedimiento de diagnóstico estándar o exponiéndolo a dosis innecesariamente altas trayendo como consecuencia la sobreirradiación del paciente.

A. ASPECTOS TEÓRICOS

1. FUNDAMENTOS DE LOS ACTIVIMETROS

1.1 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

Un Activímetro (También llamado Calibrador de Dosis) está constituido básicamente por un detector gaseoso, en esencia es una cámara de ionización de tipo pozo o reentrante en cuyo interior se sitúa una fuente radiactiva para medir su actividad. (Figura 1.1).

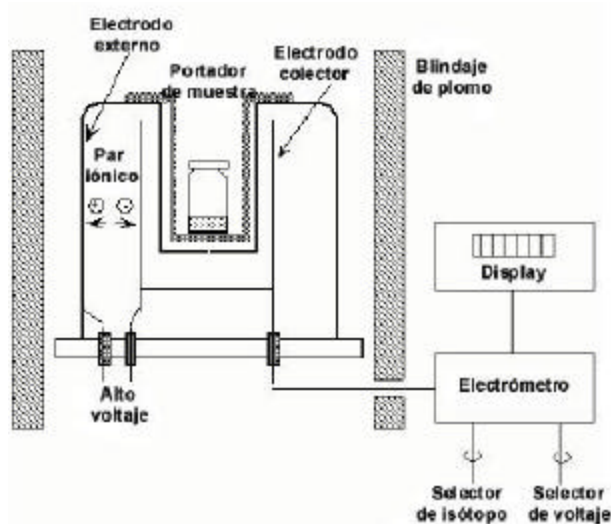


Fig. 1.1 Diagrama en Bloque de un Activímetro

La Actividad se mide en términos de la corriente de ionización que producen las radiaciones emitidas al interactuar con el gas. La cámara está sellada, el gas de llenado se encuentra a una presión superior a la atmosférica, normalmente entre 10 y 20 atmósferas, con el objeto de tener una buena eficiencia cuenta con dos electrodos cilíndricos coaxiales, aislados entre sí y conectados a una fuente de alta tensión y un aparato de medición de corriente que al establecer una diferencia de potencial, la corriente iónica o pares iónicos producidos por el paso de la radiación ionizante a través del gas (Figura 1.2) – para una energía determinada y en primera aproximación – es proporcional a la actividad de la fuente radiactiva y mediante un proceso de calibración adecuado, puede conseguirse que la cámara indique directamente el valor de la actividad de la fuente radiactiva ^[1].

El comportamiento de éstos pares iónicos depende de la naturaleza y la presión del gas de llenado y del voltaje aplicado. De acuerdo con éste último, los iones producidos pueden chocar entre sí y recombinarse, o pueden alcanzar los electrodos respectivos: los e^- se dirigen al ánodo y los iones positivos al cátodo. Cuando los pares iónicos son recogidos por los electrodos se origina una corriente en el aparato de medición. Esta corriente se convierte en señales digitales en el detector mediante un circuito electrónico asociado. Así, permiten la lectura de la actividad de la muestra directamente en μCi , mCi ó MBq ^[2].

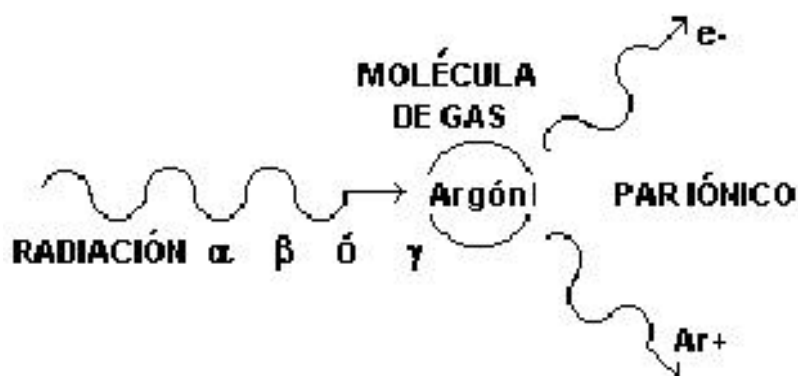


Fig. 1.2

El electrómetro asociado convierte la corriente de ionización en una señal de voltaje, la cual se amplifica, procesa y despliega, generalmente en una forma digital, y se expresa en unidades de actividad: becquerel (Bq) o curie (Ci). Esto es posible gracias a que la corriente de ionización es directamente proporcional a la actividad de un radionúclido en particular, si se tiene una geometría fija y una respuesta lineal de la fuente radiactiva. La respuesta de una cámara de ionización a las radiaciones provenientes de radionúclidos diferentes, varía de acuerdo con el tipo, la energía y la abundancia de ellas, siendo la tasa de la emisión de la energía fotónica la consideración más importante. Esto quiere decir, que si se desea que las mediciones de las actividades de diferentes radionúclidos estén siempre en unidades de actividad, es necesario ajustar en forma apropiada la amplificación de la señal de voltaje ^[1].

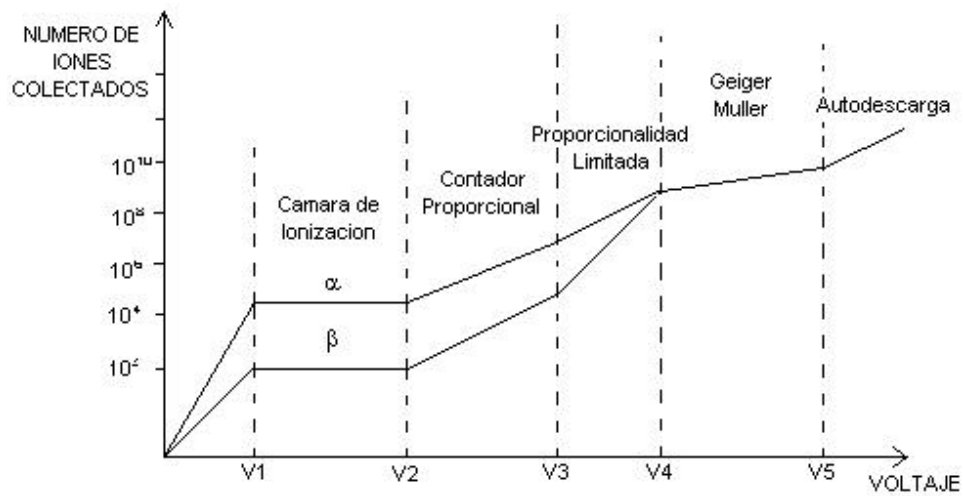


Fig. 1.3 Zona de Trabajo de una Cámara de Ionización de un Activímetro con respecto a otros Detectores Gaseosos. Las líneas α y β corresponden a partículas que originan ionización inicial diferente.

En la Figura 1.3 se representa la variación de la corriente con el voltaje aplicado. La distribución de velocidades de los iones generados en el detector por el campo de radiación es aleatoria y a un proceso de recombinación se le superpone uno de desplazamiento hacia los electrodos (por efecto del campo eléctrico debido a la diferencia de potencial aplicada).

En estas condiciones, si la diferencia de potencial es cero, la corriente registrada será también cero a pesar de que continuamente se están formando pares iónicos. Ya que estos al no tener energía suficiente para separarse se recombinan inmediatamente. A medida que se aumenta el potencial aplicado, aumenta el campo eléctrico y algunos iones adquieren energía cinética suficiente como para alcanzar los electrodos y por lo tanto aumentará la corriente hasta que a partir de un cierto valor de voltaje aplicado todos los iones producidos en el gas son recogidos; en efecto, al aumentar el potencial aplicado aumenta la rapidez de migración de los iones hacia los electrodos y se reduce así el tiempo de permanencia de los iones en el volumen del detector, por lo que es menor la probabilidad de recombinación. (Figura 1.3: V1).

Se alcanza entonces una corriente que permanece constante aunque aumente la tensión dentro de cierto límite, ya que el número de pares iónicos formados en esta etapa depende solamente del poder ionizante de la radiación incidente.

Todos los pares iónicos recogidos son primarios, es decir, provienen de la ionización directa por las radiaciones. Este intervalo de voltaje define la llamada región de ionización simple o región de saturación.

De todo lo dicho se desprende que al ser la corriente producida entre esos voltajes, función del número de pares iónicos formados, se obtendrá una intensidad de corriente distinta para radiaciones alfa, beta y gama ya que su ionización específica es distinta. Los detectores que funcionan en la región de ionización simple son los llamados cámara de ionización^[2].

La mayoría de los calibradores de dosis cuentan con selectores – interruptores o teclas – o con módulos enchufables para los distintos radionúclidos, con los cuales se logra este ajuste de voltaje a través de la selección de un resistor fijo que determina la amplificación. Como una alternativa o una adición, se puede proveer un resistor de variabilidad continua (potenciómetro) con una carátula con números específicos para cada radionúclido.

Como el espesor de las paredes de la cámara debe ser relativamente grande para soportar la presión del gas de llenado, los Activímetros se utilizan preferentemente para la medida de nucleidos que emitan radiación gamma, bien directamente o a partir de un proceso de aniquilación.

El blindaje de plomo que rodea la cámara de ionización protege al personal en contra de los peligros que implican las radiaciones y reduce la respuesta del instrumento a las radiaciones ambientales, pero no evita su respuesta al fondo de radiación residual provocado por posible contaminación radiactiva del portamuestra del Activímetro o forro del pozo de la cámara de ionización.

Algunos Activímetros cuentan con un control de cero continuamente ajustable mediante el cual se puede hacer “desaparecer” esta respuesta de fondo. Si no se cuenta con este dispositivo, es necesario anotar esta respuesta de fondo y – si ella es significativa – restarla de las actividades que se midan subsecuentemente. Usualmente, el fabricante incluye un forro removible que puede asearse fácilmente en el caso de que ocurra una contaminación radiactiva en el interior del pozo de la cámara de ionización ^[1].

Además de la cámara de ionización, otros componentes de la cadena de medida son:

- Una fuente de tensión estabilizada para proporcionar la polarización adecuada a la cámara.
- Un electrómetro adecuado para la medida de las corrientes de ionización producidas en la cámara que son muy débiles, del orden de pA.
- Electrónica para el procesamiento y presentación de los datos.
- Dispositivos de visualización e impresión de resultados de la medida.
- Dispositivos para la colocación de fuentes radiactivas en contenedores de distintas formas y tamaños.
- Interface para selección de opciones e introducción de datos ^[3].

La respuesta característica de un Activímetro (Curva Típica de Sensibilidad) en función de la energía de los fotones se esquematiza en la siguiente Figura 1.4.

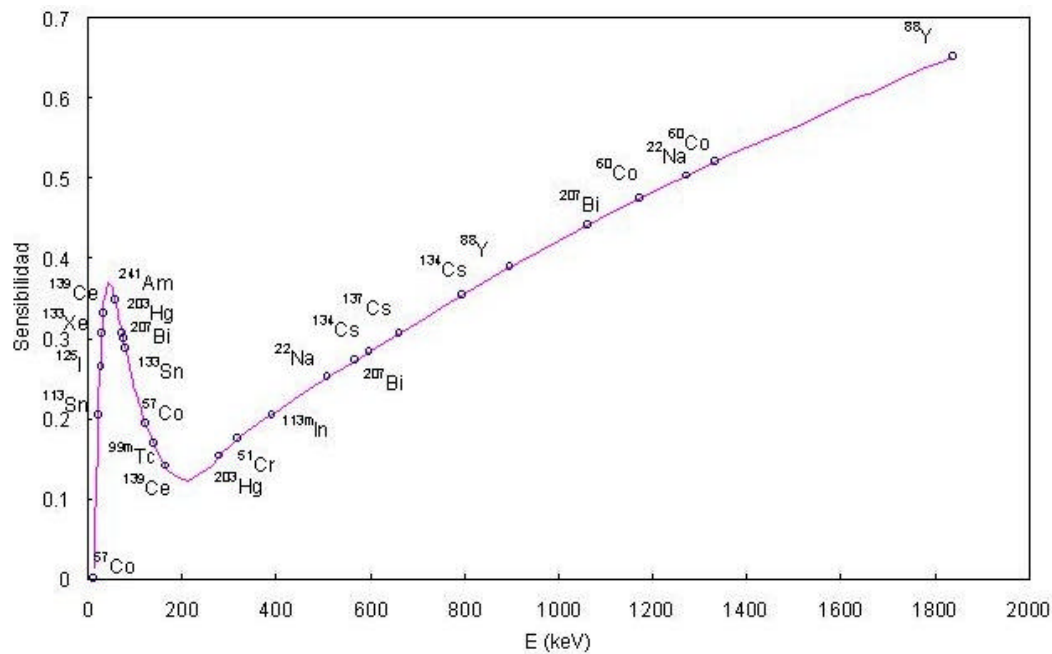


Fig. 1.4 Curva característica de respuesta de un Activímetro en función de la energía de la radiación.

La curva crece inicialmente hasta un máximo relativo a baja energía, alrededor de 40 keV a 45 keV, descendiendo de nuevo hasta comenzar una subida monótona por encima de unos 200 keV.

El comportamiento a bajas energías está dominado por dos factores fundamentales: la atenuación de los fotones al atravesar las paredes y a la contribución del efecto fotoeléctrico (interacción de los fotones con los iones del gas). Cuando la energía de los fotones crece y la importancia de estos fotones disminuye, se produce una disminución de la eficiencia o sensibilidad, hasta que comienza a crecer de nuevo debido a la contribución de los electrones Compton producidos en la interacción de los fotones con las paredes de la cámara y el gas de llenado^[4].

1.2 TIPOS DE ACTIVIMETROS

Los Activímetros más difundidos poseen como detector una cámara de ionización (Deluxe Isotope II y PTW-Freiburg 3), cuyo diseño es tal que variaciones no muy grandes del volumen de la muestra a medir o de su posición no influyen notablemente en el resultado; no obstante, cada fabricante especifica al volumen y tipo de recipiente adecuados, incluyendo, además factores de corrección para otros volúmenes y envases, que se utilizan esencialmente en Medicina Nuclear.

Actualmente se cuenta en el mercado con Activímetros que utilizan Tubos de Geiger-Müller, algunos de ellos poseen dos detectores colocados uno a la derecha y otro a la izquierda del pozo contenedor y alejados del mismo, con lo que se reducen las variaciones debidas a la posición y volumen de las muestras, manteniendo la sensibilidad y aumentando la máxima actividad medible sin cometer error por coincidencias. Otros modelos poseen solamente un detector colocado debajo del pozo.

La eficiencia intrínseca para conteo gamma o X de un detector Geiger-Müller es muy baja ya que la producción de un pulso proveniente de la radiación electromagnética requiere la formación de electrones secundarios a partir de su interacción con el material del tubo. Como el número atómico de este material es bajo, solamente para radiaciones de baja energía ($< 20 \text{ keV}$) el coeficiente de absorción es alto y es despreciable para fotones de alta energía.

En la construcción de Activímetros con Geiger-Müller se ha mejorado la eficiencia de detección de la radiación gamma utilizando materiales de alto número atómico para las paredes del tubo. La eficiencia no depende solamente de la fracción de rayos gamma que son absorbidos, sino también de que los electrones secundarios alcancen o no su interior.

Estos deberán producirse en una sección de la pared que esté a una distancia del interior del tubo menor que su alcance, y por lo tanto se ha tenido en cuenta el espesor de las paredes.

Existen modelos de Activímetros especializados para la detección de emisores de partículas beta. En ellos, el elemento detector es un cristal de yoduro de sodio optimizado para la medida de la radiación de frenado producida por las partículas. En este caso el detector funciona como un contador de impulsos y no como un medidor de corriente, con lo que los componentes electrónicos y de procesamiento de la señal son distintos, e incluyen frecuentemente una cierta capacidad de discriminación en energías^[2].

2. FACTORES DE CORRECCIÓN

Los activímetros son calibrados normalmente por el fabricante siguiendo procedimientos que incluyen el uso de fuentes radiactivas certificadas. La calibración individual de los equipos es necesaria porque es imposible para los fabricantes garantizar que todas las unidades de un determinado modelo de activímetro tengan respuestas idénticas. La trazabilidad o certificación de las medidas puede garantizarse o bien mediante una calibración realizada por el laboratorio nacional o bien por terceras partes cuya certificación al laboratorio nacional haya sido demostrada. Alternativamente, el usuario puede calibrar su equipo siempre que siga un procedimiento adecuado, utilice fuentes certificadas y cumpla las condiciones que reglamentariamente se determinen.

La respuesta de un activímetro es función de una serie de variables, cada una de las cuales puede dar lugar a errores e introducir incertidumbres significativas en el proceso de calibración. Los factores principales que hay que considerar cuidadosamente se describen a continuación:

Blindaje. La necesidad de disminuir la corriente de fondo de la cámara hace necesario en muchas ocasiones el uso de un blindaje alrededor del equipo de medida. Este blindaje puede alterar la respuesta de la cámara si es significativamente distinto del existente en el momento de la calibración.

El aumento del blindaje también puede afectar en forma significativa a la exactitud del calibrador de dosis, porque el plomo que se agrega contribuye con una dispersión mayor de las radiaciones, haciendo necesario el cambio de los valores de calibración previos.

Pureza radionucleica. Ningún radionucleido es 100% químicamente puro. La existencia de otros radionucleidos puede influir significativamente en la calibración y su efecto debe tenerse en cuenta.

Sistemas generadores. Cuando se calibra un activímetro para muestras que contienen sistemas con dos nucleidos padre-hijo (Ej.: ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$), el estado de equilibrio entre ellos deberá tenerse en cuenta al establecer el factor de calibración.

Electrónica. Los modernos activímetros incluyen un conjunto de sistemas electrónicos que realizan diversas funciones, como cálculos y presentación de resultados. Normalmente, están sujetos a mantenimiento propio, y su comprobación se realiza diariamente por medio de las medidas de la fuente de referencia.

Geometría de la medida, su importancia se discutirá posteriormente^[3].

2.1. FACTOR DE CALIBRACIÓN (f)

El proceso de calibración se basa en la medida de la actividad de varias fuentes de referencia (como Co-57, Cs-137, Ba-133 y Co-60) y a su comparación con los resultados indicados por el Activímetro de los radioisótopos utilizados en Medicina Nuclear (como Tc-99m y I-131). El factor de calibración f está definido como:

$$f = \frac{A}{A_i} \quad 2.1$$

donde: A Valor de referencia para la actividad de la fuente.

A_i Valor neto indicado por el activímetro (= lectura - fondo).

El factor de calibración f es un número sin dimensiones, corresponde a un radionúclido determinado y está ligado al concepto de geometría de referencia.

El proceso de determinación del factor de calibración para un activímetro, un nucleido y una geometría de referencia dados consta de los siguientes pasos:

1. La medida del fondo radiactivo b .

Para la medida del fondo se realizará una serie de medidas consecutivas, y se tomará la media de todos ellos como mejor estimador del valor de b .

2. La colocación de una fuente de referencia certificada, de actividad A , en una posición fija y reproducible.

Se cuidará especialmente que el conjunto formado por el contenedor de la muestra que se mide y el dispositivo utilizado para colocarlo dentro del activímetro definan una geometría que pueda ser reproducida en medidas posteriores.

3. La medida del valor de actividad indicado por el activímetro d

Los pasos 2 y 3 se repetirán varias veces, colocando cada vez de nuevo la muestra en el activímetro. El valor medio de la serie de medidas obtenidas proporcionará el valor de d . El número de medidas realizadas deberá ser tal que la desviación estándar de la media de la serie de medidas sea comparable o inferior a la incertidumbre típica de A .

4. El valor del factor de calibración f se obtendrá como:

$$f = \frac{A}{d - b} \quad 2.2$$

Hay que recalcar que este factor de calibración solo es válido para un conjunto de nucleido y geometría idénticos a los usados en su determinación. Para cualquier otra geometría se deberá calcular el factor de geometría g en la forma que se indica posteriormente. Si se utiliza otro nucleido, deberá calcularse un factor distinto repitiendo todo el proceso.

Se utilizarán siempre fuentes de referencia cuyas actividades sean certificadas a los patrones nacionales de actividad o, en su defecto, a patrones nacionales de otros países. Se procurará que se asemejen lo más estrechamente posible a las muestras que se vayan a medir posteriormente^[3].

2.1.1 INCERTIDUMBRE DEL FACTOR DE CALIBRACIÓN

La incertidumbre del factor de calibración m_f se calcula a partir de la siguiente expresión.

$$m_f = \sqrt{\left(\frac{1}{(d-b)}\right)^2 m_A^2 + \left(\frac{A}{(d-b)^2}\right)^2 (m_d^2 + m_b^2)} \quad 2.1.1$$

Las componentes individuales se obtienen de la forma siguiente:

2.1.1.1 Incertidumbre debida a la actividad de la fuente de referencia (m_A)

Se obtiene directamente del certificado de calibración de la fuente.

Generalmente corresponde a :

$$k = 1 \quad 2.1.1.1$$

2.1.1.2 Incertidumbre debida a la variación del fondo radiactivo. (m_b)

La incertidumbre asociada se determina a partir de la desviación estándar de la media del conjunto de medidas realizadas para determinar el fondo. Para n medidas, la incertidumbre viene dada por:

$$m_b = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (b_k - \bar{b})^2} \quad 2.1.1.2$$

2.1.1.3 Incertidumbre de la medida realizada con el activímetro (m_d)

Consta a su vez de los siguientes componentes:

(i) Incertidumbre debida a la resolución del visor digital (m_l): Si la resolución del indicador digital es ΔA la incertidumbre debida a este efecto es la que se deriva de una distribución de probabilidad rectangular^[5]:

$$m_l = \sqrt{\frac{(\Delta A)^2}{12}} = \frac{\Delta A}{\sqrt{12}} \quad 2.1.1.3$$

(ii) Incertidumbre debida a la repetibilidad de la muestra (\mathbf{m}_r): Su valor se determina a partir de la serie de medidas realizadas para el cálculo de \mathbf{d} . Se toma para ello la desviación estándar de la media de la serie:

$$\mathbf{m}_r = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (Z_k - \bar{Z})^2} \quad 2.1.1.4$$

(iii) Incertidumbre debida a la reproducibilidad en la posición de la muestra: Se determina conjuntamente con el valor anterior si la serie de medidas se realiza colocando tras cada medida la fuente de referencia.

La combinación cuadrática de las dos componentes proporciona el valor de \mathbf{m}_d :

$$\mathbf{m}_d = \sqrt{\mathbf{m}_r^2 + \mathbf{m}_l^2} \quad 2.1.1.5$$

2.1.2 EXPRESIÓN DEL RESULTADO DE LA MEDIDA

Conocidos el valor del factor de calibración (f) y su incertidumbre (\mathbf{m}_f), el resultado obtenido se expresará como:

$$f \pm k \cdot \mathbf{m}_f \quad 2.1.2$$

detallando el valor de k que se ha utilizado, según el certificado de calibración de la fuente ^[5].

2.2. FACTOR DE GEOMETRÍA(g).

Todos los Activímetros de dosis muestran alguna dependencia en la geometría de la medición. Este efecto decrece si se incrementa la profundidad del pozo. Muchos de estos instrumentos traen consigo tablas con los factores de corrección aplicables a las mediciones de la radiactividad de diferentes radionúclidos en jeringas, frascos, viales y en otros contenedores de tamaños y tipos diferentes . No obstante, los departamentos de medicina nuclear deben determinar los factores de corrección apropiados a sus situaciones individuales. Debe tomarse en cuenta que los factores de corrección para el uso de jeringas son diferentes si éstas tienen adaptada la aguja o no la tienen ^[4] .

El factor de calibración f es válido solamente para las medidas realizadas en la misma configuración geométrica en la que se obtuvo. Para cualquier cambio de ésta, deberá determinarse el factor de geometría correspondiente.

La respuesta de los Activímetros depende de las condiciones de la medida, entre las que cabe destacar:

- El tipo del contenedor (ampolla, vial, jeringa...).
- El material de que está construido éste (plástico, vidrio...), y sus dimensiones (espesor de paredes, homogeneidad de éstas, etc.).
- El volumen y composición de la muestra.
- La posición del contenedor en el interior del Activímetro.

La dependencia de la posición del contenedor es particularmente importante para el caso de los emisores gamma de baja energía, para los que pequeños cambios en las condiciones de la medida pueden dar lugar a grandes variaciones en la respuesta del Activímetro para un mismo valor de la actividad medida; a cada conjunto posible de condiciones de medida, le corresponderá por lo tanto un factor de calibración propio.

Para simplificar el proceso de calibración, es conveniente definir para cada nucleido una geometría de referencia, caracterizada por un conjunto de parámetros que correspondan a las condiciones experimentales más adecuadas para su calibración. A esa geometría le corresponderá un factor de calibración f . Para cualquier otra geometría, el factor de calibración deberá corregirse con un factor de geometría g que tenga en cuenta la respuesta diferente del Activímetro al cambiar la geometría de referencia ^[3].

$$g = \frac{\text{Valor indicado por el Activímetro en la Geometría de Referencia}}{\text{Valor indicado por el Activímetro en la Geometría de la medida}} \quad 2.3$$

Entonces el valor del factor de corrección (f_c) vendrá dado por:

$$f_c = f \cdot g \quad 2.4$$

siendo el valor de g en la geometría de referencia igual a la unidad.

Si el Activímetro ha sido calibrado previamente en una geometría definida como de referencia el proceso consiste en:

1. La medida de la fuente en la geometría de referencia.
2. La transferencia de toda o una parte de la disolución radiactiva desde el contenedor de la fuente de referencia a la nueva geometría. Deberá hacerse de manera que pueda determinarse con precisión la fracción p de la actividad inicial que se ha transferido al nuevo contenedor (mediante pipeteo, pesada, etc.). Alternativamente, la nueva geometría puede consistir en una simple variación de la posición de la fuente radiactiva en el interior del Activímetro, sin que exista un cambio de contenedor ni otro tipo de manipulación de éste.

3. La adición, si fuese necesario, de disolución portadora para alcanzar un volumen determinado.

4. La medida de la fuente en la nueva geometría.

El valor del factor de geometría vendrá dado por:

$$g = p \frac{(c - b)}{(d - b)} \quad 2.5$$

donde:

p es la Alícuota o fracción de la actividad inicial que se ha transferido a la nueva geometría para la que se quiere determinar el factor de corrección.

c es el valor indicado por el Activímetro en la geometría de referencia, sin descontar el fondo.

d es el valor indicado por el Activímetro en la geometría para la que se quiere determinar el factor de corrección, sin descontar el fondo.

b es el fondo radiactivo.

2.2.1 INCERTIDUMBRE DEL FACTOR DE GEOMETRÍA

La incertidumbre del factor de geometría (***m_g***) se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$m_g = \sqrt{\left(\frac{c-b}{d-b}\right)^2 m_p^2 + \left(\frac{p}{d-b}\right)^2 m_c^2 + \left(\frac{p.(c-b)}{(d-b)^2}\right)^2 m_d^2 + \left(\frac{p.(c-d)}{(d-b)^2}\right)^2 m_b^2}$$

2.2.1

2.2.1.1 Incertidumbre de las lecturas del activímetro m_c y m_d

Corresponden a las medidas en la geometría de referencia c y la nueva geometría d respectivamente, se calculan en forma idéntica a lo indicado en 2.1.1.3 aplicando la combinación cuadrática de la incertidumbre de la resolución del visor digital y la incertidumbre debida a la repetibilidad de la muestra.

2.2.1.2 Incertidumbre debida a la variación del fondo radiactivo m_b

Se calcula análogamente a como se indicó en 2.1.1.2, esto es como la desviación estándar de la media de la serie de medidas utilizadas para determinar b .

2.2.1.3 Incertidumbre en la determinación de la alícuota m_p

Para la transferencia del material radiactivo de la geometría de referencia a la nueva geometría, se debe tomar en cuenta la forma en que se ha realizado, por lo que se da a continuación unas normas generales para el cálculo de su incertidumbre.

- (i) Si se ha transferido un volumen determinado por medio de una pipeta calibrada, la incertidumbre estará especificada por el fabricante y se tomará para $k = 1$.
- (ii) Si la transferencia se realiza por medio de una jeringa graduada, se estimará la incertidumbre típica a partir de los datos proporcionados por el fabricante o determinados por el usuario.

- (iii) Cuando no exista transferencia de la fuente radiactiva de un contenedor a otro, sino cambio de posición de una misma fuente en el interior del activímetro, se tendrá $p = 1$ y la incertidumbre asociada será $m_p = 0$.
- (iv) Si el control de la alícuota transferida se ha realizado gravimétricamente, el procedimiento es el siguiente:

Supóngase que se parte de una geometría de referencia ($k=1$) definida a partir de un vial cuya masa de disolución activa se conoce previamente y es:

$$m_A \pm k m_{m_A} \quad 2.1.1.1$$

Se transfiere una parte de la masa activa a una jeringuilla. Para determinar la masa (y por lo tanto la actividad) transferida se sigue el siguiente procedimiento:

- a) Se determina mediante una balanza la masa de la jeringa vacía:

$$m_j \pm m_{m_j} \quad 2.2.1.2$$

donde la incertidumbre m_{m_j} se obtiene a partir de la incertidumbre indicada por el fabricante de la balanza, cuyo valor es normalmente del orden de la última cifra significativa indicada en la balanza.

- b) Se transfiere una fracción de la masa activa a la jeringa y se determina la nueva masa:

$$m_{jA'} \pm m_{m_{jA'}} \quad 2.2.1.3$$

c) La masa transferida será:

$$m_t = m_{jA'} - m_j \quad 2.2.1.4$$

y su incertidumbre vendrá dada por:

$$m_{m_t} = \sqrt{\left(m_{m_{jA'}}^2 + m_{m_j}^2\right)} \quad 2.2.1.5$$

d) El valor de la alícuota p viene dado por:

$$p = \frac{m_t}{m_A} \quad 2.2.1.6$$

y su incertidumbre m_p se calcula como:

$$m_p = \sqrt{\left(\frac{1}{m_A}\right)^2 \left(m_{m_{jA'}}^2 + m_{m_j}^2\right) + \left(\frac{m_t}{m_A^2}\right)^2 m_{m_A}^2} \quad 2.2.1.7$$

2.2.2 EXPRESIÓN DEL RESULTADO DE LA MEDIDA

Conocidos el valor del factor de geometría (g) y su incertidumbre (m_g), el resultado obtenido se expresará como:

$$g \pm k \cdot m_g \quad 2.2.2$$

detallando el valor de k que se ha utilizado, según el certificado de calibración de la fuente ^[5].

3. CONTROL DE CALIDAD DE UN ACTIVIMETRO

El incorrecto funcionamiento de un Activímetro conduce a la administración de dosis diferentes a los establecidos para cada estudio, sea este de diagnóstico o tratamiento. Para que esto no ocurra es necesario controlar el equipo periódicamente, llevando a cabo un programa adecuado de control de calidad que exprese la aproximación con que las mediciones efectuadas en el Activímetro se acercan al valor correcto en cada caso, libre de errores.

Los datos obtenidos en las pruebas de control de calidad deben ser registrados y graficados para una mejor visualización de la evolución de los parámetros. De nada sirve medir, si no se registran estos datos para poder analizarlos y tomar las medidas correctivas que correspondan. De estas acciones dependerá el beneficio que se obtiene de un programa de control de calidad.^[1]

3.1. PRUEBAS PARA LA ACEPTACIÓN Y DE REFERENCIA.

Una vez que el Activímetro fue instalado, se deben aplicar las pruebas de aceptación para establecer si está bien calibrado y saber si cumple con las especificaciones del fabricante. Al mismo tiempo se deberán hacer pruebas de referencia para obtener datos con los cuales se pueda comparar los controles periódicos que se harán diaria, semanal, mensual o anualmente.

Estas pruebas deben repetirse eventualmente, después de la reparación de una falla mayor o cuando se le cambia de lugar físico. Si por alguna razón no se hicieran las pruebas de aceptación en el momento de recibir el equipo, deben llevarse a cabo en el momento de iniciar los controles periódicos.

3.1.1 Inspección Física.

El propósito de esta prueba es examinar las condiciones generales de un Activímetro, para esto se tomará en cuenta lo siguiente:

1. Inspeccionar el exterior del Activímetro en busca de evidencias de daño. Examinar con atención particular la vecindad de la cámara de ionización con el fin de detectar signos posibles de deformación o abolladuras.
2. Reconocer todos los controles, teclas e interruptores. Identificar tornillos flojos, controles de ajuste difícil, módulos enchufables que no se pueden colocar adecuadamente e interruptores que no responden fácilmente a la presión digital.
3. Revisar todos los conectores. Verificar que no falte alguno y examinar los cables y enchufes en busca de daños.
4. Si el Activímetro dispone de la posibilidad de comprobar la alta tensión aplicada al detector, deberá verificarse que corresponde con la recomendada por el fabricante. Para cualquier medida posterior, se comprobará la constancia del valor utilizado en la calibración.
5. Inspeccionar todos los accesorios, como dispositivos para manipulación remota, portadores de fuentes radiactivas, forros para el pozo y estuches para investigar las filtraciones de ^{99}Mo . Verificar que no falte alguno o se encuentre dañado.
6. Revisar cualquier fuente radiactiva sellada que acompañe al equipo y comprobar que no haya filtración ni contaminación radiactiva externa.
7. Comprobar la existencia de los manuales de operación y de servicio.
8. Anotar la localización de los fusibles y verificar la provisión de reemplazos.

9. Verificar la compatibilidad de los requerimientos de corriente del equipo con la línea eléctrica disponible y efectuar los ajustes pertinentes.
10. Tomar nota de la localización de cualquier envase con algún agente desecante y comprobar las condiciones de éste. En el caso de que muestre un nivel alto de humedad, secarlo en un horno y volverlo a colocar en su envase.
11. Realizar un inventario del Activímetro y de sus accesorios, registrando sus condiciones en el momento de recibirlo, con referencia particular a cualquier daño, deficiencia o defecto y a las acciones que se sugieren para su corrección^[1].

3.1.2 Pruebas de Precisión, Exactitud y Estabilidad.

La exactitud de un Activímetro depende de numerosos factores. Cada instrumento se calibra individualmente en la fábrica con un juego de fuentes radiactivas certificadas que, en el mejor de los casos, tienen un error menor de $\pm 1 \%$ de la actividad indicada, pero que también puede tener errores de $\pm 3 \%$ y hasta de $\pm 5 \%$, que limitan su exactitud inicial.

Esta puede variar con el tiempo, como resultado de la presión cambiante del gas en el interior de la cámara y de los cambios electrónicos lentos. Además, la exactitud de cualquier medición individual depende de la similitud entre el material radiactivo que se mide y la fuente de referencia original.

Las diferencias de las características de la absorción de las radiaciones por los materiales, pueden causar errores importantes en la medición, especialmente cuando los radionúclidos en uso son emisores de radiaciones gama de energía baja.

El propósito de esta prueba es comprobar la precisión, exactitud y estabilidad de un Activímetro, en la medición de la actividad en las condiciones geométricas usuales y con energías selectas de la radiación gama.

Materiales.

- Fuentes selladas de radiación gama, de energías baja, mediana y alta, certificadas con una incertidumbre de $\pm 5\%$ o menos. Por ejemplo: ^{57}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs y ^{60}Co .
- Portador de fuentes radiactivas.
- Dispositivo para la manipulación remota de fuentes radiactivas.

Para cada fuente radiactiva:

1. Seleccionar las condiciones de operación apropiadas para el radionúclido concerniente.
2. Anotar la lectura de fondo que se debe sustraer de las actividades que se midan subsecuentemente. Como una alternativa, ajustar apropiadamente el control para el ajuste del cero.
3. Con la ayuda del dispositivo para manipulación remota, insertar la fuente radiactiva en el portador e introducir ambos en el pozo del instrumento.
4. Dejar que transcurra el tiempo suficiente para la estabilización de la lectura.
5. Medir y anotar la actividad. Sustraer la lectura de fondo, si es que es necesario.
6. Repetir el paso 5 hasta un total de 10 lecturas sucesivas.
7. Sacar el portador del instrumento y extraer la fuente radiactiva por medio del dispositivo para manipulación remota.

Precisión

Para evaluar la precisión (IAEA-TEC DOC- 602/S), calcular para cada fuente radiactiva, las diferencias porcentuales entre las actividades medidas individualmente, A_i , y su promedio \bar{A} . Esto es :^[1]

$$\frac{100(A_i - \bar{A})}{\bar{A}} \% \quad 3.1$$

y para comprobar y caracterizar el grado de dispersión de los valores obtenidos en las medidas hechas por el equipo se realizará mediante el cálculo de la desviación estándar, cuya expresión viene dada por :^[3]

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (Z_k - \bar{Z})^2} \quad 3.2$$

donde:

n es el número de medidas realizadas.

Z_k es el valor obtenido en la k-ésima medida.

\bar{Z} es el valor medio de la serie de medidas.

Exactitud

Para valorar la exactitud (IAEA-TEC DOC- 602/S), calcular para cada fuente radiactiva la diferencia porcentual entre la actividad promedio que se midió \bar{A} , y la actividad certificada de la fuente, corregida por su decaimiento radiactivo al día de la medida C . Esto es:

$$\frac{100(\bar{A} - C)}{C} \% \quad 3.3$$

Si se pueden seleccionar las condiciones de operación para el radionúclido concerniente, ya sea por medio de un interruptor, de una tecla o mediante un potenciómetro, el procedimiento pertinente se debe efectuar dos veces: primero con el selector de radionúclidos que el Activímetro permita y luego con el radionúclido que se desea medir; los resultados deben ser acordes.

El procedimiento descrito comprueba la exactitud del instrumento para medir la radiactividad de los radionúclidos empleados en la prueba, pero no necesariamente verifica la exactitud de las mediciones de otros radionúclidos. Esto puede ser una limitante importante, especialmente para los instrumentos con selectores de radionúclidos por medio de interruptores o teclas.

Cuando el instrumento se utiliza para calibrar las dosis terapéuticas de radionúclidos no sellados, es especialmente recomendable que la exactitud del calibrador sea comprobada anualmente con fuentes certificadas con los radionúclidos involucrados.

En el caso de no disponer de una fuente de referencia con un radionúclido de interés particular, es posible lograr una estimación de la exactitud del instrumento en las mediciones de la actividad logrados con un radionúclido distinto, del conocimiento del decaimiento radiactivo de ambos y de la función de la respuesta de la cámara de ionización a la energía de sus radiaciones. Así, es posible utilizar una fuente certificada de ^{57}Co para estimar la exactitud del calibrador en la medición de la actividad del $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Es conveniente solicitar un asesoramiento al respecto por parte del fabricante. No obstante, este procedimiento cuenta con muchas probabilidades de provocar errores de consideración cuando las energías de las radiaciones involucradas son bajas ^[1].

Límites para la Aceptación.

Los límites para la aceptación de los resultados de la prueba están determinados por las especificaciones del fabricante en relación con la precisión y la exactitud del instrumento.

Las medidas que se efectúen con las fuentes especificadas deben tener una precisión tal, que todas las determinaciones individuales de las actividades de cualquiera de ellas deben ofrecer datos que se encuentren dentro de $\pm 5 \%$ de la actividad promedio medida, siempre y cuando el decaimiento radiactivo tenga un efecto insignificante durante el período de medición. La exactitud debe ser tal, que la actividad promedio medida sea $\pm 10 \%$ del valor certificado de la fuente corregido por el decaimiento radiactivo al día de la medición ^[7].

Estabilidad (e)

Para la comprobación de la estabilidad a largo plazo, se medirá diariamente una fuente radiactiva de referencia (como Cs-137 por su largo período de semidesintegración), registrando el resultado de la medida y comparando el valor obtenido, una vez corregido por decaimiento radiactivo, con las medidas anteriores para identificar cualquier comportamiento anómalo. A partir del registro histórico de las medidas, podrá estimarse la contribución de incertidumbre debida a este efecto ^[3] y verificar la constancia de los factores de calibración de cada radionúclido, comprobando la integridad de los componentes electrónicos específicos que utiliza el instrumento para realizar la medida ^[6].

La forma más directa de calcular el índice de estabilidad es a partir de la desviación estándar de la serie de medidas Z_k realizadas con la fuente de referencia:

$$s_Z = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (z_k - \bar{z})^2} \quad 3.4$$

En esta expresión Z_k representa el conjunto de medidas realizadas con la fuente y Z el valor medio obtenido, corregido por decaimiento. La incertidumbre típica relativa debida al factor de estabilidad será:

$$Z_r = \frac{s_Z}{Z} \quad 3.5$$

Se puede calcular ahora el índice de estabilidad para el caso de la medida de la muestra de la fuente radiactiva. En primera aproximación, la incertidumbre relativa sobre el valor d medido será igual a la correspondiente a la fuente de constancia, por lo que la incertidumbre típica sobre d debida a este efecto se podrá calcular como:

$$e = e_r \cdot d \approx Z_r \cdot d = d \cdot \frac{s_Z}{Z} \quad 3.6$$

Se deberá mantener un registro de todas las medidas de comprobación realizadas, incluyendo las características y la actividad de las muestras medidas, así como la fecha de realización (Figura 3.1.2). En lo posible, las medidas de estabilidad se presentarán preferiblemente en forma de tablas o gráficos ^[3].

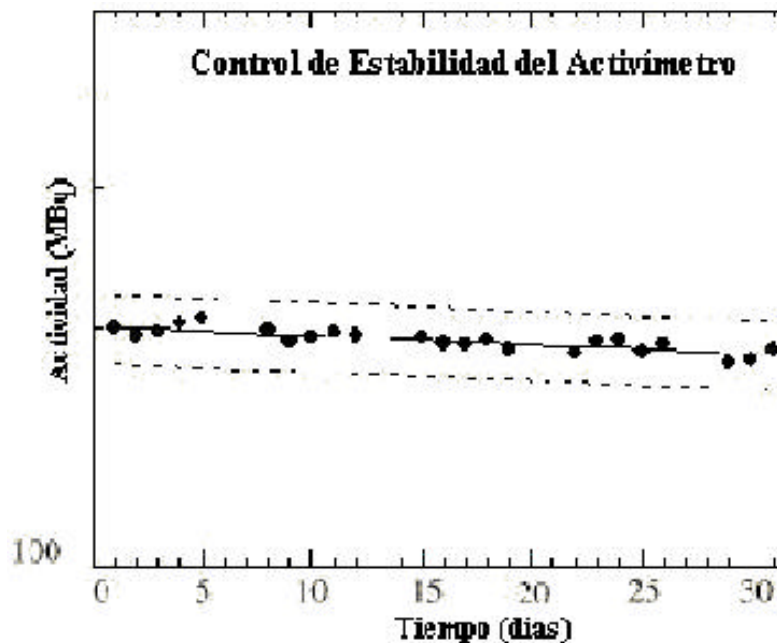


Fig. 3.1.2 Control de Estabilidad de un Activímetro.

3.1.3 Prueba de la Linealidad de la Respuesta a la Actividad

El propósito de esta prueba es comprobar la linealidad de la respuesta de un Activímetro, en relación con el espectro de las actividades que se medirán.

Para muestras de actividades altas los Activímetros dejan de comportarse en forma lineal, es decir no suministran una respuesta proporcional a la actividad. Ello se debe a variaciones en la recombinación de la carga creada en el volumen activo de la cámara de ionización.

Este efecto depende del radionúclido medido y debe evaluarse para determinar el intervalo de actividad en el cual el Activímetro puede utilizarse en forma fiable y establecer las correcciones que sea necesarias^[3].

Método 1: Método del decaimiento de una Fuente Radiactiva

Materiales

1. Solución de un radionúclido de vida media física corta (^{99m}Tc o ^{113m}In), con una actividad inicial igual o mayor que la actividad máxima para la que se empleará el instrumento (p.ej.: 3.7 GBq [100 mCi]).
2. Frasco para la solución radiactiva.
3. Dispositivo para pipeteo a control remoto.
4. Portador de fuentes radiactivas.
5. Dispositivo para la manipulación remota del frasco.

Procedimiento

1. Transferir la solución radiactiva a un frasco por medio de un dispositivo para el pipeteo a control remoto. Cerrar firmemente el frasco.
2. Seleccionar las condiciones de operación para el radionúclido concerniente.
3. Anotar la lectura de fondo que se debe sustraer de las actividades que se midan subsecuentemente. Como una alternativa, ajustar apropiadamente el control para el ajuste del cero.
4. Con la ayuda del dispositivo para manipulación remota, insertar el frasco con la solución radiactiva en el portador de fuentes radiactivas e introducir ambos en el pozo del instrumento.
5. Dejar que transcurra el tiempo suficiente para la estabilización de la lectura.
6. Medir y anotar la actividad. Sustraer la lectura de fondo si es que es necesario. Registrar la hora exacta en la que se efectuará la lectura.
7. Sacar el portador del instrumento y extraer por medio del dispositivo para manipulación remota.

8. Repetir regularmente los pasos 2-7 durante un período varias veces mayor que la vida media física del radionúclido, que sea lo suficientemente largo para que la fuente decaiga a una actividad igual o menor que la actividad más pequeña para la que se empleará el instrumento.

Esta técnica es adecuada para radionúclidos de vida media muy corta ^[1].

Límites para la Aceptación.

En general, la linealidad de la respuesta a la actividad debe ser tal que todas las actividades individuales medidas durante la prueba se encuentran dentro de $\pm 10\%$ de los valores correspondientes a la línea recta ajustada a los puntos de datos. Sin embargo, es posible utilizar un instrumento aún cuando los efectos de saturación provoquen desviaciones de la linealidad de hasta $\pm 25\%$, siempre y cuando estas desviaciones sean estables y las actividades que se midan sean corregidas adecuadamente con los datos de la gráfica ^[7].

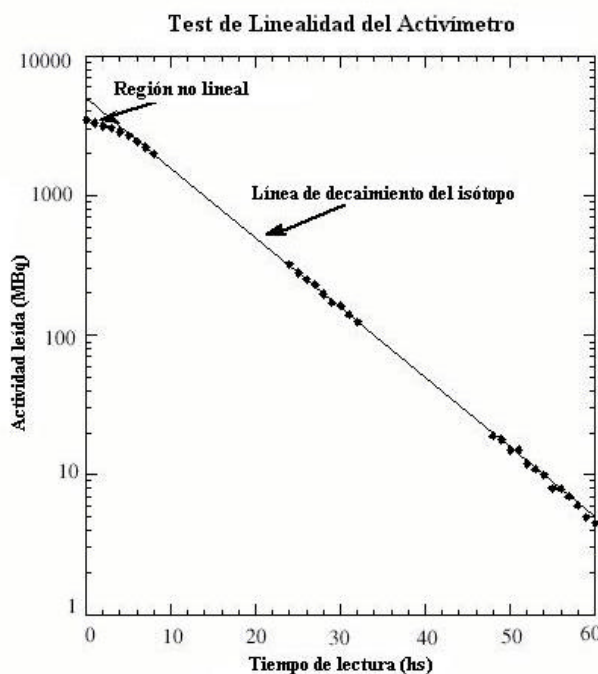


Fig. 3.1.3 Comportamiento lineal y no lineal de un Activímetro observado al seguir el decaimiento de una fuente radiactiva.

Método 2: Método de las Fuentes Radiactivas Graduadas

Materiales.

1. Solución de un radionúclido de vida media física moderada (p.ej.: ^{131}I), con una actividad igual o mayor que el doble de la actividad más alta que para la que se empleará el instrumento (p.ej.: 7.4 GBq [200mCi]).
2. Frascos para muestras.
3. Dispositivo para pipeteo a control remoto.
4. Portador de fuentes radiactivas.
5. Dispositivo para la manipulación remota de los frascos.

Advertencia.

El manejo de cantidades grandes de material radiactivo implícito en este método, requiere del uso de guantes, blindajes y dispositivos para el pipeteo y manejo remoto de las soluciones radiactivas. Si se emplea el ^{131}I , éste debe pipetearse y almacenarse para su decaimiento en una campana de extracción con flujo adecuado de aire. No se debe proseguir con éste método si se carece de estos dispositivos protectores.

Procedimiento.

1. Con la ayuda del dispositivo de control remoto, pipetear, en una serie de frascos para muestra, volúmenes decrecientes de la solución radiactiva que contengan actividades que cubran la escala de interés (p.ej.: 10, 5, 2, 1, 0.5, 0.2, 0.1 ml de una solución que contenga 370 MBq/ml [10 mCi/ml]). Completar con agua un volumen constante en el contenido de todos los frascos (p.ej.: 20ml) y taponear éstos con firmeza.
2. Seleccionar las condiciones de operación apropiadas para el radionúclido concerniente.

3. Anotar la lectura de fondo que se debe sustraer de las actividades que se midan subsecuentemente. Como una alternativa ajustar apropiadamente el control de ajuste del cero.
4. Con la ayuda del dispositivo para manipulación remota, insertar el frasco con la actividad mayor en el portador e introducir ambos en el pozo del instrumento.
5. Dejar que transcurra el tiempo suficiente para la estabilización de la lectura.
6. Medir y anotar la actividad. Sustraer la lectura de fondo si es que es necesario.
7. Sacar el portador del instrumento y extraer el frasco por medio de un dispositivo para manipulación remota.

La inexactitud del pipeteo de la solución radiactiva, debido a técnica defectuosa o al empleo de pipetas mal calibradas, puede producir resultados erróneos. Se tendrá también en cuenta la posible influencia de la variación geométrica debida al cambio de volumen de la fuente. Esta técnica es adecuada para radionucleidos de vida media más larga.

Límites para la Aceptación.

La linealidad de la respuesta a la actividad debe ser tal que todas las actividades individuales medidas durante la prueba se encuentran dentro de $\pm 10 \%$ de los valores correspondientes a la línea recta ajustada a los puntos de datos. Sin embargo, es posible utilizar un instrumento aún cuando los efectos de saturación (falla común que puede ser consecuencia del deterioro de algunos componentes) provoquen desviaciones de la linealidad de hasta $\pm 25 \%$, siempre y cuando estas desviaciones sean estables y las actividades que se midan sean corregidas adecuadamente según los datos teóricos ^[1].

3.1.4 Pruebas de la Respuesta al Fondo y Sensibilidad.

El propósito de esta prueba es comprobar la respuesta al fondo de un Activímetro, en condiciones en las que es más fácilmente observable cualquier aumento en la respuesta, revelando la existencia de ruido electrónico, contaminación radiactiva del calibrador, presencia cercana de fuentes radiactivas relativamente intensas y necesidad de mejor blindaje.

La existencia de un fondo de radiación en la zona donde esté situado el Activímetro da lugar a una corriente de ionización que debe descontarse de la medida de cualquier fuente. La medida del fondo radiactivo deberá realizarse a menudo, al menos una vez al día, aunque la frecuencia de esta comprobación dependerá de la variación temporal del fondo en la zona de la medida. Algunos Activímetros disponen de la capacidad de realizar una medida larga de fondo que luego se sustrae automáticamente de cada medida posterior.

Procedimiento.

1. Seleccionar las condiciones de operación apropiadas para cualquier radionúclido, elegido por su emisión lenta de energía fotónica (menor probabilidad de emisi), manifestada por una constante de dosis de radiación gama pequeña (p.ej.: ^{51}Cr ó ^{133}Xe).
2. Anotar la lectura de fondo, en unidades de actividad, del radionúclido concerniente. Como una alternativa, ajustar apropiadamente el control para ajustar el cero y anotar su posición.

Hay que prestar atención al hecho de que cualquier cambio de blindaje del activímetro o en sus inmediaciones puede modificar el fondo y probablemente también la respuesta general del equipo, cuya calibración deberá hacerse de nuevo. Un aumento del blindaje de plomo en torno de la cámara de ionización de un Activímetro producirá en principio una disminución del fondo de radiación externo al equipo, pero puede también dar lugar a un cambio en la exactitud de la respuesta de éste, debido a la mayor contribución de fotones retrodispersados en el blindaje.

Un Activímetro sin control para ajustar el cero siempre debe mostrar una respuesta medible al fondo. Lo contrario puede indicar un error en el ajuste preestablecido del cero, mismo que puede provocar mediciones erróneas de la actividad, especialmente al medir actividad bajas.

El fondo general causado por la radiación ambiental puede sufrir fluctuaciones, pero no son de esperarse cambios notables en la respuesta al fondo en comparación con los que se observaron durante las pruebas para la aceptación o de referencia.

Un incremento importante de la respuesta de fondo puede indicar una contaminación radiactiva del instrumento, o un aumento de la radiación ambiental proveniente de fuentes radiactivas locales. Si se observa un incremento de este tipo debe sacarse el forro del pozo del instrumento antes de repetir la prueba.

El retorno a una repuesta normal es indicativo de una contaminación del forro, en cuyo caso éste debe reemplazarse. El forro se puede volver a usar una vez que se haya lavado o después del transcurso del tiempo necesario para que decaiga por completo la radiactividad contaminante. La elevación persistente de la respuesta del fondo puede sugerir otras contaminaciones del instrumento o un aumento de la radiación ambiental provocado por fuentes radiactivas locales. Ambas posibilidades deben explorarse.

Límites para la Aceptación.

Aunque no se pueden establecer los límites específicos para los resultados de esta prueba, un aumento de 20 % ó mas, en la respuesta al fondo requiere de una investigación más cuidadosa ^[1].

Sensibilidad (S)

El fondo de radiación o background F debe controlarse de forma sistemática en las escalas de radionúclidos de uso frecuente y cualquier variación del fondo debe ser tenido en cuenta ^[2]. Se debe determinar $F \pm m_F$.

Los valores de la incertidumbre del fondo m_F determinan la sensibilidad del Activímetro, que es la mínima actividad medible con exactitud aceptable y se define como un determinado múltiplo de m_F .

Según el criterio de Curie ^[8], tenemos que :

$$S = 10 m_F \quad 3.7$$

3.2 VERIFICACIONES OPERATIVAS.

Cada día que se utilice el Activímetro es necesario efectuar verificaciones operativas sencillas de la reproducibilidad de su operación y de su respuesta al fondo. Además, el control regular de su calidad debe comprender estimaciones de su precisión y exactitud y de la linealidad de su respuesta a la actividad ^[1].

3.2.1 Verificación de la Reproducibilidad.

El propósito de esta prueba es verificar la reproducibilidad, día a día, de la operación de un Activímetro, en relación con la actividad de los radionúclidos de uso común.

Materiales

1. Fuente sellada de radiaciones gama de energía mediana, vida media larga, con una actividad cercana a 3.7 MBq. (100 mCi). Son apropiadas las fuentes de ^{133}Ba , de ^{137}Cs o de ^{226}Ra . Es posible el uso de una fuente certificada, aunque en este caso no se necesita saber su actividad exacta.
2. Portador de fuentes radiactivas.
3. Dispositivo para la manipulación remota de la fuente radiactiva.

Procedimiento

1. Seleccionar las condiciones de operación apropiadas para el radionúclido de uso más común (p.ej.: $^{99\text{m}}\text{Tc}$).
2. Anotar la lectura de radiación de fondo que se debe sustraer de las actividades que se midan subsecuentemente. Como una alternativa ajustar apropiadamente el control para el ajuste del cero.
3. Con la ayuda del dispositivo para la manipulación remota, insertar la fuente radiactiva en el portador e introducir ambos en el pozo del instrumento.
4. Dejar que transcurra el tiempo suficiente para la estabilización de la lectura.
5. Medir y anotar la actividad aparente. Sustraer la lectura de fondo si que es necesario.
6. Sacar el portador del instrumento y extraer la fuente radiactiva por medio del dispositivo para manipulación remota.

Para los propósitos de la prueba, se puede considerar que este decaimiento es lineal durante un período corto en comparación con la vida media física respectiva (p.ej.: un año).

Debe reconocerse que, en vista de que generalmente las condiciones seleccionadas para la operación del instrumento no son las apropiadas para el radionúclido integrante de la fuente, la actividad aparente que se registra puede diferir mucho de la actividad verdadera. Esto carece de importancia en la comprobación simple de la reproducibilidad del desempeño del instrumento.

También se debe de considerar que el procedimiento descrito verifica la reproducibilidad del instrumento bajo las condiciones de operación seleccionadas, pero no comprueba necesariamente su operación bajo las condiciones adecuadas para otros radionúclidos. Esta es una limitación importante, especialmente en los instrumentos con interruptores, teclas o módulos enchufables para los distintos radionúclidos. Con instrumentos de este tipo, el procedimiento debe extenderse periódicamente para cubrir a todos los radionúclidos para los cuales se han establecido condiciones específicas.

En este caso, es necesario anotar la actividad aparente para cada grupo de condiciones es turno. Asimismo, si las condiciones de operación para el radionúclido en particular se seleccionan por medio de un interruptor, una tecla o bien mediante un potenciómetro, el procedimiento debe efectuarse en dos ocasiones, primero con la modalidad que permita la otra. Los resultados deben concordar. Algunos fabricantes de Activímetros aportan una fuente de radiaciones gama de vida larga en el momento de la compra del instrumento.

En este caso es posible solicitar que la actividad aparente de la fuente sea determinada en el curso de la calibración en la fábrica, bajo las condiciones de operación para cada radionúclido que cuente con una posición específica en el sistema de interruptores, teclas o en el potenciómetro con escala métrica, y que los valores que se determinen se hagan constar en el manual de operación del instrumento. Estos valores deben ser confirmados con la misma fuente radiactiva como parte de las pruebas para la aceptación del instrumento y vueltos a confirmar trimestralmente, como parte del control rutinario de la calidad, con el fin de poder detectar cualquier cambio que ocurra en la exactitud del instrumento ^[1].

Límites para la Aceptación.

Los límites para la aceptación de los resultados de esta prueba, están determinados parcialmente por la precisión del instrumento según las especificaciones del fabricante. Sin embargo, por lo general, la reproducibilidad de los resultados de las mediciones efectuadas con las fuentes especificadas debe ser tal que todas las actividades medidas individualmente deben ser de $\pm 5\%$ de la actividad promedio medida, siempre y cuando el decaimiento radiactivo no cause un efecto notable durante el período de la prueba.

Esta se pueden indicar mediante dos líneas rectas paralelas a la primera, arriba y debajo de ella respectivamente, a una distancia determinada por la precisión del instrumento según las especificaciones del fabricante (p.ej.: $\pm 5\%$ de la actividad esperada). Un resultado individual presente fuera de estos límites puede indicar una operación defectuosa del instrumento ^[1].

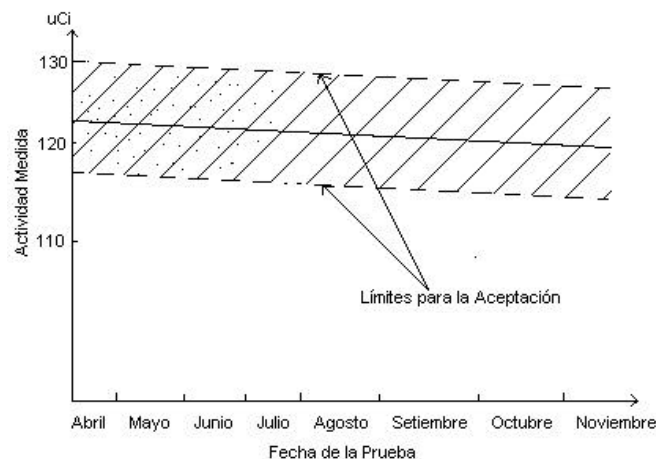


Fig. 3.2 Verificación de la Reproducibilidad. Parte de una Gráfica de Control.

3.2.2 Verificación de la Respuesta al Fondo.

El propósito de esta prueba es verificar la respuesta al fondo de un Activímetro con las condiciones de operación apropiadas para un radionúclido en particular.

Procedimiento.

1. Seleccionar las condiciones de operación apropiadas para el radionúclido concerniente.
2. Anotar la lectura de fondo que se debe sustraer de las actividades que se midan subsecuentemente. Como una alternativa, ajustar apropiadamente el control para el ajuste del cero y anotar su posición.

Un incremento importante de la respuesta de fondo puede indicar una contaminación radiactiva del instrumento, o un aumento de la radiación ambiental proveniente de fuentes radiactivas locales. Si se observa un incremento de este tipo debe sacarse el forro del pozo del instrumento antes de repetir la prueba. El retorno a una respuesta normal es indicativo de una contaminación del forro, en cuyo caso éste debe reemplazarse.

El forro se puede volver a usar una vez que se haya lavado o después del transcurso del tiempo necesario para que decaiga por completo la radiactiva contaminante. La elevación persistente de la respuesta del fondo puede sugerir otras contaminaciones del instrumento o un aumento de la radiación ambiental provocado por fuentes radiactivas locales. Ambas posibilidades deben explorarse^[1].

Límites para la Aceptación.

Aunque no se pueden establecer los límites específicos para los resultados de esta prueba, un aumento de 20 % o más, en la respuesta al fondo, requiere de una investigación más cuidadosa^[1].

B. ASPECTOS EXPERIMENTALES

4. EQUIPOS Y MATERIALES

La Parte Experimental de este trabajo se realizó en el Departamento de Medicina Nuclear del Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas INEN. Se utilizaron los siguientes equipos y/o materiales:

- a) Un Activímetro Deluxe Isotope Calibrator II (de 25 keV a 3 MeV); Unidad de Control de 286 mm (11 ¼ ") de ancho x 146 mm (5 ¾") de alto x 305 mm (12 ") de altura. Con un poder de consumo de 10 W; 115 V a 220 V y 50 Hz a 60 Hz (Figura 4.1)
- b) Una Cámara de Ionización de tipo Pozo 34-056: Unidad de Detector: Base 220 mm² (8 5/8 ") x Altura de la Cámara 427 mm (16,8 "), con una Presión de Argón en su interior de 12 atm. completamente protegido con 3,2 mm de plomo (Figura 4.2).
- c) Un Activímetro PTW – Freiburg Curiementor 3; Display 12001 / 12003, de dimensiones 86 mm x 264 mm x 176 mm. Con un poder de consumo de 5 W a 8 W, 100 (1 ± 15 %) V a 230 (1 ± 15 %) V y 50 Hz a 60 Hz (Figura 4.3).
- d) Una Cámara de Ionización de tipo Pozo 233652, de dimensiones 210 mm Ø x 240 mm, con una Presión de Argón en su interior de 10 atm ± 1 atm y un $V_{\text{máx}} = 1000 \text{ V}$ (Figura 4.4).
- e) Dos Fuentes Certificadas: Cs - 137 Modelo NES 356 s/n S356028 - 020 y Ba - 133 Modelo NES 358 s/n S358016 - 042.

- f) Material Radioactivo: Tc - 99m de 30 mCi y 15 mCi, para las pruebas de Linealidad.
- g) Dos Contenedores de Plomo para las Fuentes Certificadas de 1 cm. de espesor de 10,5 cm. de alto x 5,5 cm. de diámetro.
- h) Dos Contenedores de plomo para las jeringuillas con y sin visor de 1 cm. de espesor de 11 cm. de altura x 4,3 cm. de diámetro y de 0,5 cm. de espesor de 9,5 cm. de altura x 4,8 cm. de diámetro, respectivamente.
- i) Se utilizaron también instrumentos y accesorios de laboratorio como: pinzas, balanza, jeringuillas, guantes.



Fig. 4.1 DELUXE ISOTOPE CALIBRATOR II



Fig. 4.2 CÁMARA DE IONIZACIÓN 34-056



Fig. 4.3 PTW-FREIBURG CURIEMENTOR 3



Fig. 4.4 CÁMARA DE IONIZACIÓN 233652

5. PROCEDIMIENTO Y MEDIDAS

El desarrollo experimental del presente estudio consistió en: determinar el factor de calibración y el factor de geometría de los dos Activímetros Deluxe Isotope Calibrator II ^[10] y PTW-Freiburg Curiementor 3 ^[11], garantizando las condiciones de operación del sistema, así como el fondo de radiación para evitar cualquier alteración en el valor de la lectura; aplicar el factor de calibración y factor de geometría a las diferentes pruebas realizadas en el control de calidad de los Activímetros, para establecer las curvas de corrección y verificar de esta manera el acercamiento de las curvas a sus valores reales.

5.1 DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CALIBRACIÓN

Se utilizaron dos fuentes de referencia sugeridas por el IAEA TEC – DOC 602/S ^[1], debido a su largo tiempo de semidesintegración y a su energía cercana a los radioisótopos mas usados en el departamento, como el Cesio - 137 y el Bario - 133 ^[12].

Para la toma de medidas, luego de la estabilización del equipo y verificado que no se encuentren fuentes de radiación abiertas cercanas, como viales con material radiactivo que altere el background o fondo de radiación, se procede a colocar la fuente de referencia en el portamuestras y bajando este en el pozo de la cámara de ionización, se espera hasta que la lectura de la actividad se muestre. Se aplicó la Ley de Decaimiento Radiactivo (Ecuación 5.1) para determinar la actividad de la fuente de referencia al día, al momento de la toma de medidas.

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad 5.1$$

Donde : A_0 Actividad inicial de la muestra.

t Tiempo transcurrido.

λ Constante de decaimiento.

La Constante de decaimiento λ se obtiene del Período de Semidesintegración $t_{1/2}$. (Ecuación 5.2).

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad 5.2$$

Luego se aplicó la ecuación 2.2 para determinar el factor de calibración obteniéndose los siguientes valores experimentales:

Tabla 5.1 Factores de Calibración para el Cesio y Bario de los Activímetros Deluxe Isotope y PTW – Freiburg.

PERIODO 2004 - 2005	DELUXE ISOTOPE		PTW – FREIBURG	
	Cesio 137	Bario133	Cesio 137	Bario133
	$f \pm m$	$f \pm m$	$f \pm m$	$f \pm m$
OCTUBRE	$0,997 \pm 0,004$	$0,982 \pm 0,005$	$1,095 \pm 0,004$	$1,053 \pm 0,005$
NOVIEMB	$0,996 \pm 0,004$	$0,995 \pm 0,005$	$1,099 \pm 0,004$	$1,055 \pm 0,005$
DICIEMBRE	$0,995 \pm 0,004$	$0,995 \pm 0,005$	$1,103 \pm 0,004$	$1,057 \pm 0,005$
ENERO	$1,000 \pm 0,004$	$0,994 \pm 0,005$	$1,108 \pm 0,004$	$1,062 \pm 0,005$
FEBRERO	$0,998 \pm 0,004$	$0,995 \pm 0,005$	$1,109 \pm 0,004$	$1,066 \pm 0,005$
MARZO	$0,999 \pm 0,004$	$0,995 \pm 0,005$	$1,113 \pm 0,004$	$1,067 \pm 0,005$
ABRIL	$0,998 \pm 0,004$	$0,994 \pm 0,005$	$1,113 \pm 0,004$	$1,070 \pm 0,005$
MAYO	$0,995 \pm 0,004$	$0,994 \pm 0,005$	$1,119 \pm 0,004$	$1,073 \pm 0,005$
JUNIO	$0,997 \pm 0,004$	$0,997 \pm 0,005$	$1,125 \pm 0,004$	$1,076 \pm 0,005$
PROMEDIO	$0,997 \pm 0,004$	$0,993 \pm 0,005$	$1,109 \pm 0,004$	$1,064 \pm 0,005$

5.2 DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE GEOMETRÍA

Se utilizaron dos fuentes preparadas de Tc – 99m de 22 mCi, uno para cada Activímetro, sugeridas por el Protocolo Español de Control de Calidad en la Instrumentación en Medicina Nuclear^[3].

Se determinó mediante una balanza la masa de la jeringuilla, se procedió a pesar nuestra geometría de referencia (vial) y luego a medir su actividad c , se transfirió una fracción de la masa activa del radioisótopo del vial a la jeringuilla y se determinó la nueva masa y actividad d .

Luego se extrajo todo el material radioactivo con la jeringuilla, se peso el vial vacío y se midió el volumen aproximado del radioisótopo en la jeringuilla calculando de esta manera el valor de la alícuota^[3] p (Ecuación 2.2.1.6).

Tabla 5.2 Valores de las componentes del Factor de Geometría.

	Alícuota p	Actividad / vial c (mCi)	Actividad / jeringuilla d (mCi)
DELUXE ISOTOPE	0,472	20,900	9,919
PTW - FREIBURG	0,472	18,087	8,424

Realizada la transferencia de una parte de la disolución radiactiva desde el contenedor de la fuente de referencia a la nueva geometría, en este caso la jeringuilla (La transferencia se realizó por medio de una jeringuilla graduada, cuya incertidumbre se determinó a partir de los datos proporcionados por el fabricante). El valor del factor de geometría se determinó por la ecuación 2.5 obteniéndose los siguientes valores experimentales:

Tabla 5.3 Factores de Geometría para los Activímetros Deluxe Isotope y PTW-Freiburg.

	g	\pm	m_g
DELUXE ISOTOPE	1,006	\pm	0,005
PTW - FREIBURG	1,152	\pm	0,005

6. RESULTADOS

6.1 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE PRECISIÓN, EXACTITUD Y ESTABILIDAD.

Para determinar la precisión y exactitud de los equipos Deluxe Isotope Calibrator II ^[10] y el PTW-Freiburg Curiementor 3 ^[11], fue necesario hacer un estudio de estabilidad (Ecuación 3.6) de los Activímetros.

Se determinó el factor de calibración durante el Período Octubre 2004 a Junio 2005 y de acuerdo a los resultados obtenidos se realizó el estudio de estabilidad de los Activímetros mostrados en la Tabla 6.1. Luego las curvas son mostradas en las Figuras 6.1.1, 6.1.2, 6.1.3 y 6.1.4.

Tabla 6.1.1 Factores de Calibración e Índices de Estabilidad para los Activímetros Deluxe Isotope y PTW - Freiburg.

PERIODO 2004 - 2005	DELUXE ISOTOPE		PTW-FREIBURG	
	FACTOR DE CALIBRACIÓN	ÍNDICE DE ESTABILIDAD	FACTOR DE CALIBRACIÓN	ÍNDICE DE ESTABILIDAD
OCTUBRE	0,997	0,101	1,095	0,092
NOVIEMBRE	0,996	0,092	1,099	0,084
DICIEMBRE	0,995	0,113	1,103	0,102
ENERO	1,000	0,091	1,108	0,082
FEBRERO	0,998	0,084	1,109	0,076
MARZO	0,999	0,090	1,113	0,081
ABRIL	0,998	0,074	1,113	0,067
MAYO	0,995	0,095	1,119	0,084
JUNIO	0,997	0,093	1,125	0,082

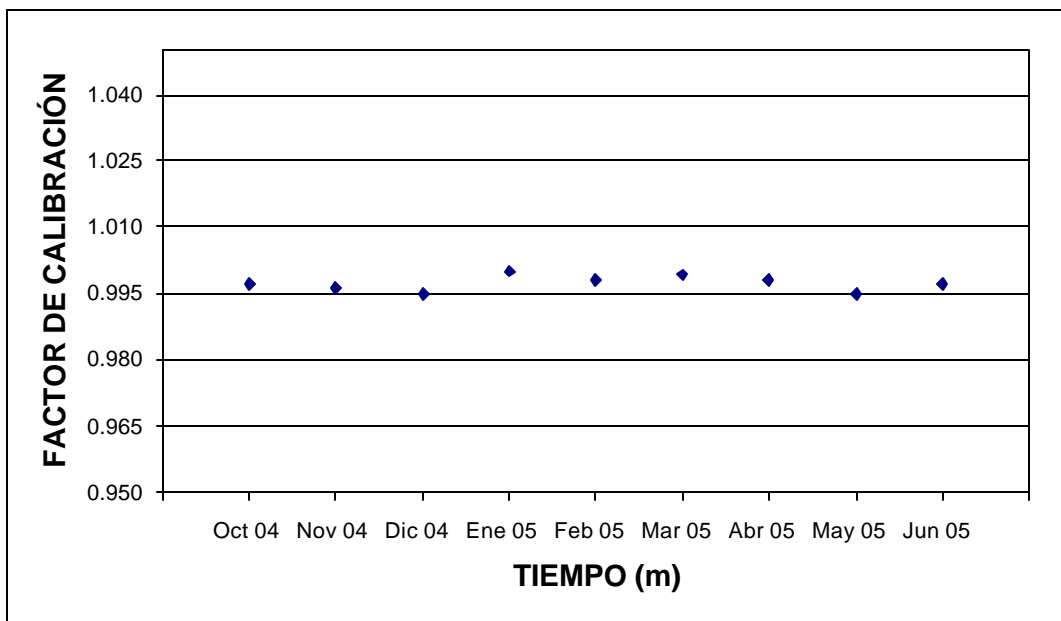


Fig. 6.1.1 Dispersión del Factor de Calibración en función del Tiempo para el Cs – 137 en el Deluxe Isotope en el Periodo Octubre 2004 - Junio 2005.

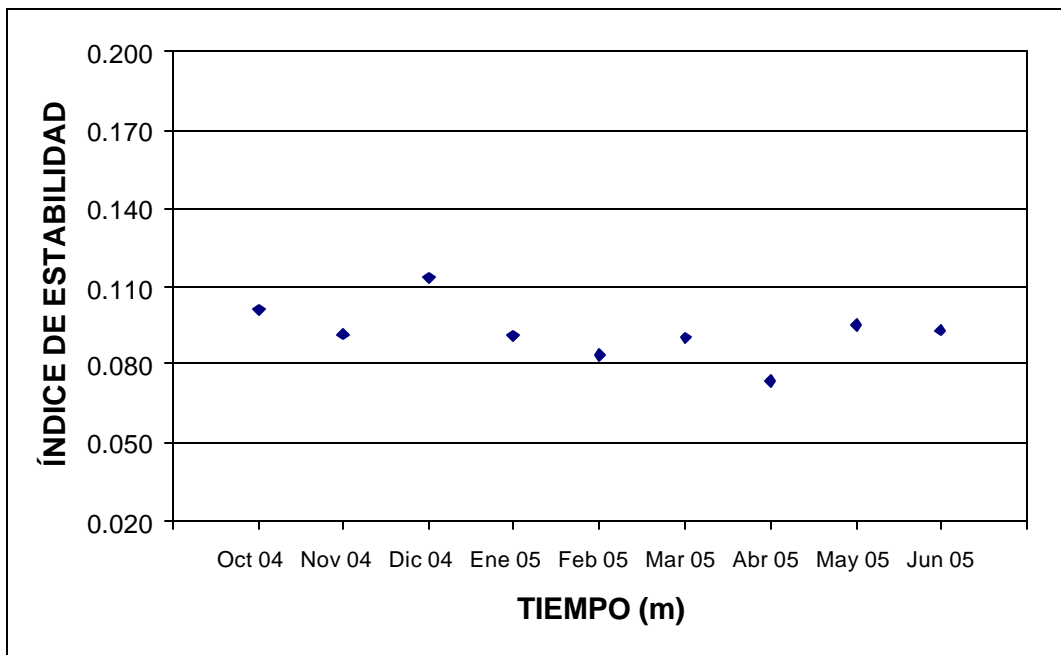


Fig. 6.1.2 Dispersión del Índice de Estabilidad en función del Tiempo para el Cs – 137 en el Deluxe Isotope en el Periodo Octubre 2004 - Junio 2005.

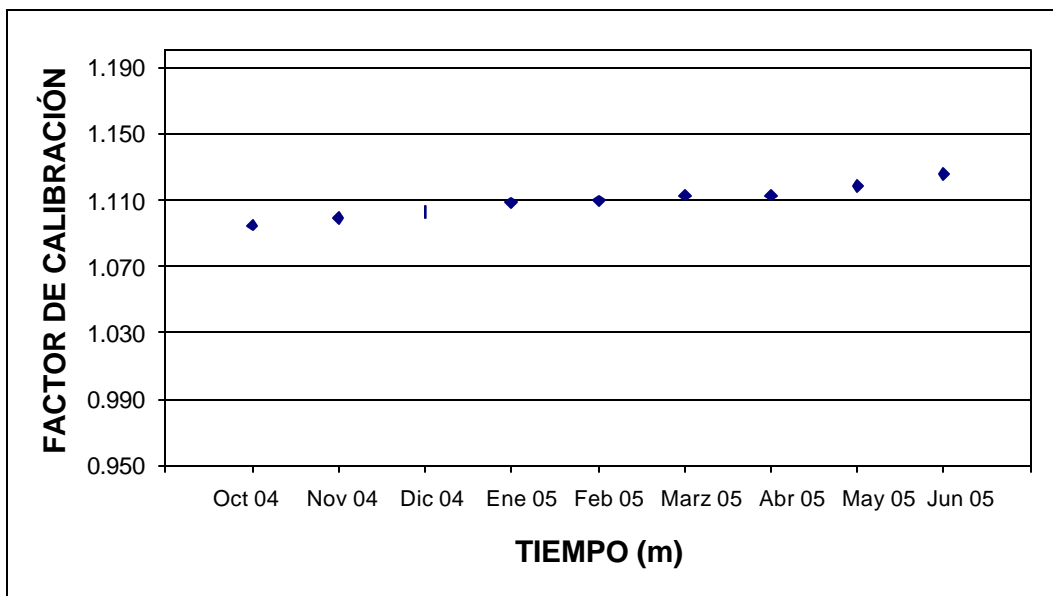


Fig. 6.1.3 Dispersión del Factor de Calibración en función del Tiempo para el Cs – 137 en el PTW - Freiburg en el Periodo Octubre 2004 - Junio 2005.

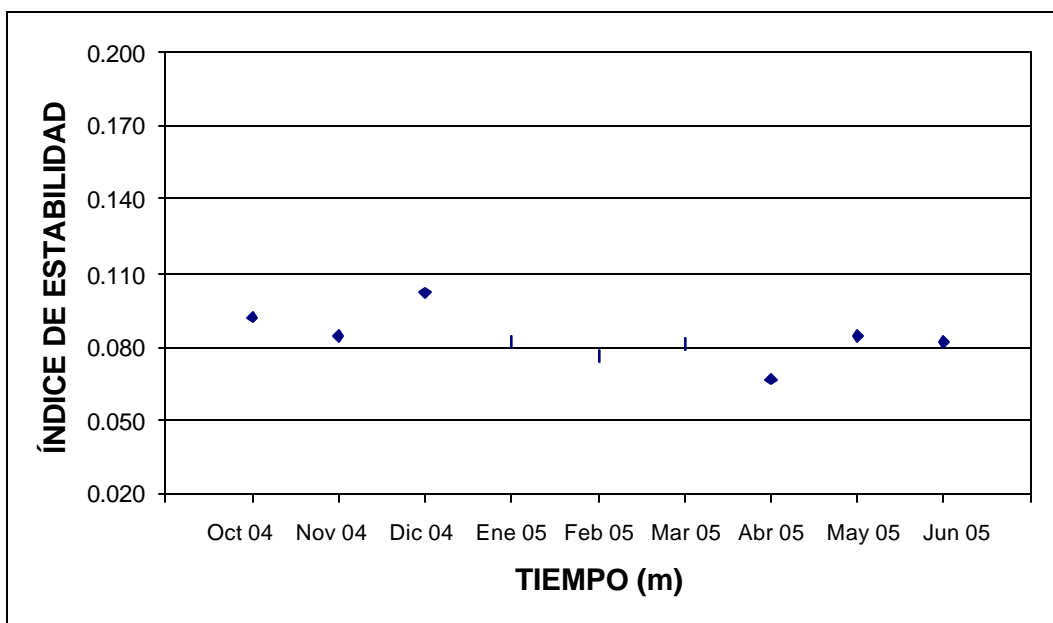


Fig. 6.1.4 Dispersión del Índice de Estabilidad en función del Tiempo para el Cs – 137 en el PTW - Freiburg en el Periodo Octubre 2004 - Junio 2005.

Una vez realizado el respectivo estudio del parámetro de estabilidad se procedió a calcular la precisión y exactitud de los equipos aplicando los factores de calibración mostrados en la Tabla 5.1, con un nivel de confianza del 98 % por la Prueba de Mann-Whitney (ANEXO D2); luego se procedió a hacer una comparación de la respuesta de los equipos Deluxe Isotope y PTW-Freiburg, antes de aplicado el factor de calibración y después de aplicado, tanto para el Cesio-137 como para el Bario-133, obteniéndose los siguientes resultados mostrados en las Tablas 6.1.2, 6.1.3 , 6.1.4 y 6.1.5.

Las Tablas 6.1.2, 6.1.3, 6.1.4 y 6.1.5 muestran los resultados en porcentajes de los 2 últimos datos obtenidos de cada mes desde el Período Octubre 2004 a Junio 2005, para cada una de las fuentes certificadas utilizadas en cada equipo.

Tabla 6.1.2 Valores de Precisión y Exactitud para el Cs - 137 sin el factor de corrección (s/fc) y con el factor de corrección (c/fc) en el Activímetro Deluxe Isotope.

PERIODO 2004 - 2005	DELUXE ISOTOPE			
	CESIO – 137 (s / fc)		CESIO – 137 (c / fc)	
	PRECISIÓN (%)	EXACTITUD (%)	PRECISIÓN (%)	EXACTITUD (%)
OCTUBRE	0,53	0,40	0,53	0,07
	-0,63	0,41	-0,63	0,08
NOVIEMBRE	0,05	0,50	0,05	0,06
	-0,53	0,52	-0,53	0,08
DICIEMBRE	-0,39	0,55	-0,39	0,08
	-0,39	0,56	-0,39	0,09
ENERO	-0,84	0,04	-0,84	0,05
	-0,91	0,06	-0,91	0,07
FEBRERO	-0,37	0,32	-0,37	0,06
	-0,37	0,33	-0,37	0,07
MARZO	-0,06	0,18	-0,06	0,05
	-0,64	0,21	-0,64	0,08
ABRIL	0,08	0,20	0,08	0,03
	0,08	0,23	0,08	0,06
MAYO	-0,06	0,59	-0,06	0,06
	-0,06	0,61	-0,06	0,08
JUNIO	-0,27	0,39	-0,27	0,07
	-0,27	0,41	-0,27	0,09

Tabla 6.1.3 Valores de Precisión y Exactitud para el Ba - 133 sin el factor de corrección (s/fc) y con el factor de corrección (c/fc) en el Activímetro Deluxe Isotope.

PERIODO 2004 - 2005	DELUXE ISOTOPE			
	BARIO – 133 (s / fc)		BARIO - 133 (c / fc)	
	PRECISIÓN (%)	EXACTITUD (%)	PRECISIÓN (%)	EXACTITUD (%)
OCTUBRE	-0,08	3,00	-0,08	0,14
	-0,08	3,04	-0,08	0,17
NOVIEMBRE	-0,06	0,70	-0,06	0,17
	-0,06	0,75	-0,06	0,23
DICIEMBRE	-0,24	0,70	-0,24	0,22
	-0,24	0,74	-0,24	0,26
ENERO	0,33	0,62	-0,33	0,14
	-0,41	0,67	0,41	0,20
FEBRERO	0,07	0,68	0,07	0,17
	0,07	0,72	0,07	0,20
MARZO	-0,15	0,65	-0,15	0,15
	-0,89	0,74	-0,89	0,24
ABRIL	0,32	0,63	0,32	0,10
	-0,43	0,70	-0,43	0,17
MAYO	-0,60	0,77	-0,60	0,17
	-0,60	0,83	-0,60	0,22
JUNIO	-0,62	0,53	-0,62	0,19
	-0,62	0,58	-0,62	0,24

Tabla 6.1.4 Valores de Precisión y Exactitud para el Cs - 137 sin el factor de corrección (s/fc) y con el factor de corrección (c/fc) en el Activímetro PTW - Freiburg.

PERIODO 2004 - 2005	PTW – FREIBURG			
	CESIO – 137 (s / fc)		CESIO – 137 (c / fc)	
	PRECISIÓN (%)	EXACTITUD (%)	PRECISIÓN (%)	EXACTITUD (%)
OCTUBRE	0,04	-8,62	0,04	0,07
	-0,21	-8,61	-0,21	0,08
NOVIEMBRE	0,10	-8,90	0,10	0,06
	-0,10	-8,88	-0,10	0,08
DICIEMBRE	-0,71	-9,21	-0,71	0,08
	-0,07	-9,20	-0,07	0,09
ENERO	-0,03	-9,59	-0,03	0,05
	-0,03	-9,57	-0,03	0,07
FEBRERO	-0,65	-9,64	-0,65	0,06
	-0,14	-9,63	-0,14	0,07
MARZO	-0,08	-10,00	-0,08	0,05
	-0,66	-9,97	-0,66	0,08
ABRIL	-0,29	-10,07	-0,29	0,03
	-0,42	-10,05	-0,42	0,06
MAYO	0,44	-10,56	0,44	0,06
	-0,81	-10,54	-0,81	0,08
JUNIO	-0,25	-11,02	-0,25	0,07
	0,48	-11,01	0,48	0,09

Tabla 6.1.5 Valores de Precisión y Exactitud para el Ba - 133 sin el factor de corrección (s/fc) y con el factor de corrección (c/fc) en el Activímetro PTW - Freiburg.

PERIODO 2004 - 2005	PTW – FREIBURG			
	BARIO - 133 (s / fc)		BARIO - 133 (c / fc)	
	PRECISIÓN (%)	EXACTITUD (%)	PRECISIÓN (%)	EXACTITUD (%)
OCTUBRE	-0,16	-4,84	-0,16	0,20
	-0,24	-4,81	-0,24	0,23
NOVIEMBRE	-0,39	-5,01	-0,39	0,17
	-0,39	-4,96	-0,39	0,23
DICIEMBRE	-0,43	-5,19	-0,43	0,22
	-0,74	-5,16	-0,74	0,26
ENERO	-0,05	-5,61	-0,05	0,14
	-0,21	-5,56	-0,21	0,20
FEBRERO	-0,31	-5,97	-0,31	0,17
	-0,55	-5,94	-0,55	0,20
MARZO	-0,13	-6,13	-0,13	0,15
	-0,53	-6,05	-0,53	0,24
ABRIL	0,20	-6,47	0,20	0,10
	-0,05	-6,40	-0,05	0,17
MAYO	-0,28	-6,63	-0,28	0,17
	-0,28	-6,58	-0,28	0,22
JUNIO	-0,48	-6,90	-0,48	0,19
	-0,07	-6,85	-0,07	0,24

6.2 RESULTADOS DE LA LINEALIDAD DE LA RESPUESTA.

Se determinó la linealidad de los dos Activímetros: Deluxe Isotope Calibartor II y el PTW-Freiburg Curiementor 3, utilizando fuentes de Tc-99m de 30 mCi y 15 mCi, registrando la lectura cada 10 minutos en un período de 150 minutos por cada prueba. Luego se registró los resultados en la forma de una gráfica lineal correlacionando la actividad medida de los dos Activímetros con el tiempo transcurrido.

Los resultados obtenidos para el Activímetro Deluxe Isotope Calibrator II, utilizando la fuente de Tc-99m de 30 mCi se muestran en la Tabla 6.2.1 y en la Figura 6.2.1.

Tabla 6.2.1 Valores Referenciales y Experimentales de la Linealidad del Activímetro Deluxe Isotope con la fuente de Tc-99m de 30 mCi.

VALORES REFERENCIALES (mCi)	VALORES DELUXE ISOTOPE (mCi)
29,600	29,600
29,036	28,900
28,482	28,400
27,939	28,000
27,406	27,400
26,883	26,800
26,371	26,100
25,868	25,800
25,374	25,200
24,891	24,900
24,416	24,300
23,950	23,800
23,494	23,400
23,046	23,000
22,606	22,600

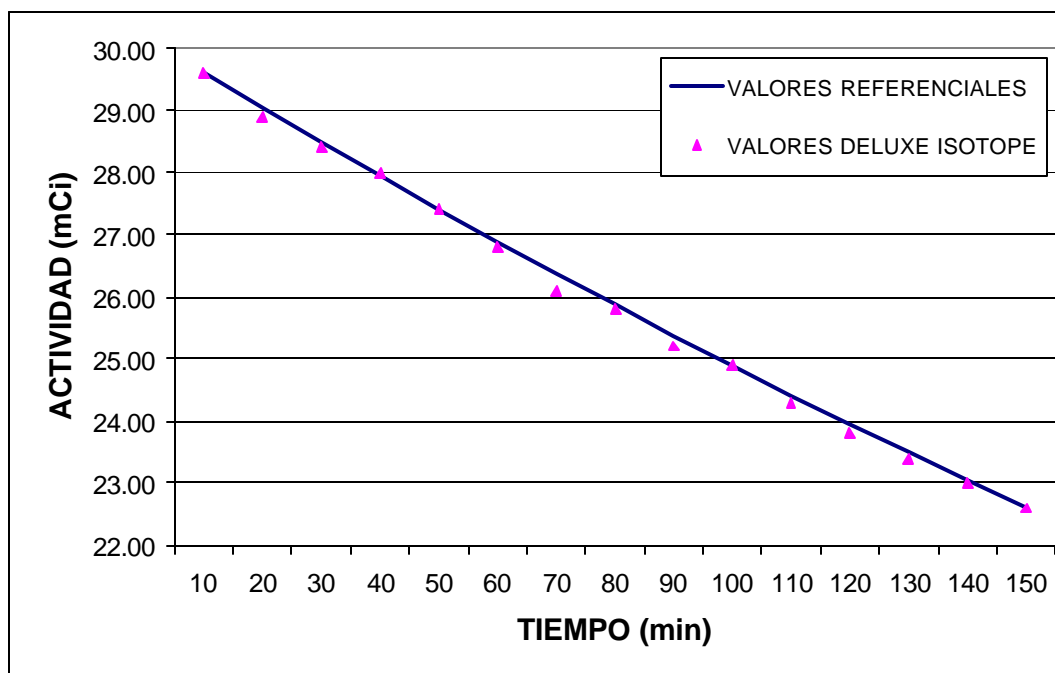


Fig. 6.2.1 Prueba de la Linealidad de la Respuesta a la Actividad, con una fuente de Tc-99m de 30 mCi en el Activímetro Deluxe Isotope Calibrator II.

Los resultados obtenidos para el Activímetro PTW-Freiburg Curiementor3 utilizando la fuente de Tc-99m de 30 mCi se muestran en la Tabla 6.2.2 y en la Figura 6.2.2.

Tabla 6.2.2 Valores Referenciales y Experimentales de la Linealidad del Activímetro PTW-Freiburg con la fuente de Tc-99m de 30 mCi.

VALORES REFERENCIALES (mCi)	VALORES PTW-FREIBURG (mCi)
29,600	23,120
29,036	22,620
28,482	22,400
27,939	21,800
27,406	21,380
26,883	21,350
26,371	20,540
25,868	20,150
25,374	19,750
24,891	19,540
24,416	18,980
23,950	18,640
23,94	18,320
23,046	18,040
22,606	17,580

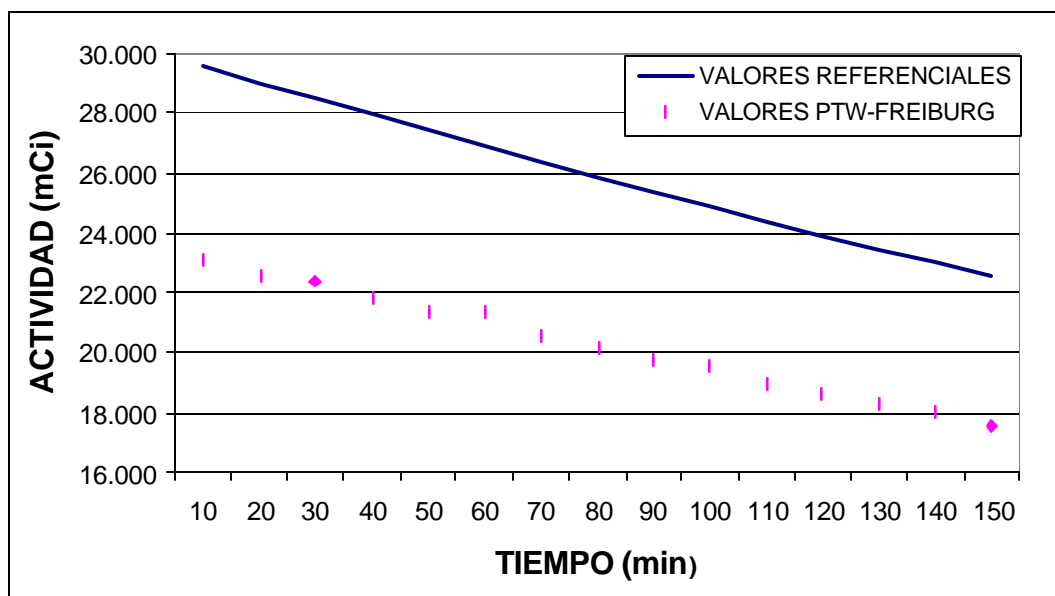


Fig. 6.2.2 Prueba de la Linealidad de la Respuesta a la Actividad, con una fuente de Tc-99m de 30 mCi en el Activímetro PTW-Freiburg Curiementor 3.

Los resultados obtenidos para el Activímetro Deluxe Isotope Calibrator II utilizando la fuente de Tc-99m de 15 mCi se muestran en la Tabla 6.2.3 y en la Figura 6.2.3.

Tabla 6.2.3 Valores Referenciales y Experimentales de la Linealidad del Activímetro Deluxe Isotope fuente de Tc-99m de 15 mCi.

VALORES REFERENCIALES (mCi)	VALORES DELUXE ISOTOPE (mCi)
13,410	13,410
13,154	13,070
12,903	12,840
12,657	12,580
12,416	12,340
12,179	12,100
11,947	11,850
11,719	11,690
11,496	11,440
11,276	11,210
11,061	10,910
10,850	10,760
10,644	10,590
10,441	10,380
10,241	10,190

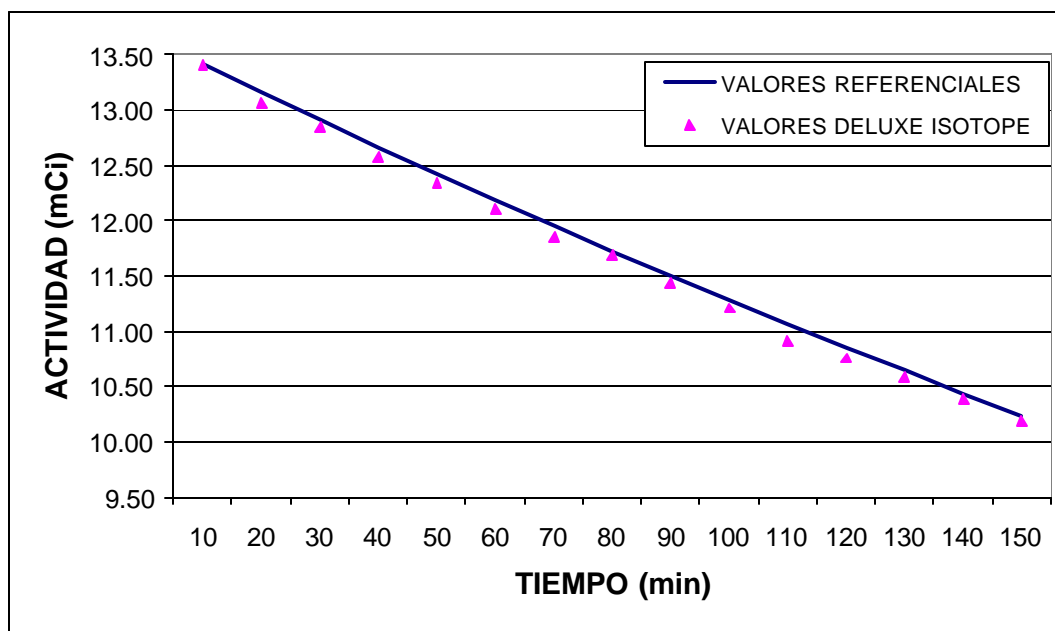


Fig. 6.2.3 Prueba de la Linealidad de la Respuesta a la Actividad, con una fuente de Tc-99m de 15 mCi en el Activímetro Deluxe Isotope Calibrator II.

Los resultados obtenidos para el Activímetro PTW-Freiburg Curiementor3 utilizando la fuente de Tc-99m de 15 mCi se muestran en la Tabla 6.2.3 y en la Figura 6.2.3.

Tabla 6.2.4 Valores Referenciales y Experimentales de la Linealidad del Activímetro PTW-Freiburg con la fuente de Tc-99m de 15 mCi.

VALORES REFERENCIALES (mCi)	VALORES PTW-FREIBURG (mCi)
13,410	10,470
13,154	10,270
12,903	10,190
12,657	9,959
12,416	9,732
12,179	9,599
11,947	9,414
11,719	9,153
11,496	8,989
11,276	8,816
11,061	8,695
10,850	8,572
10,644	8,361
10,441	8,229
10,241	7,988

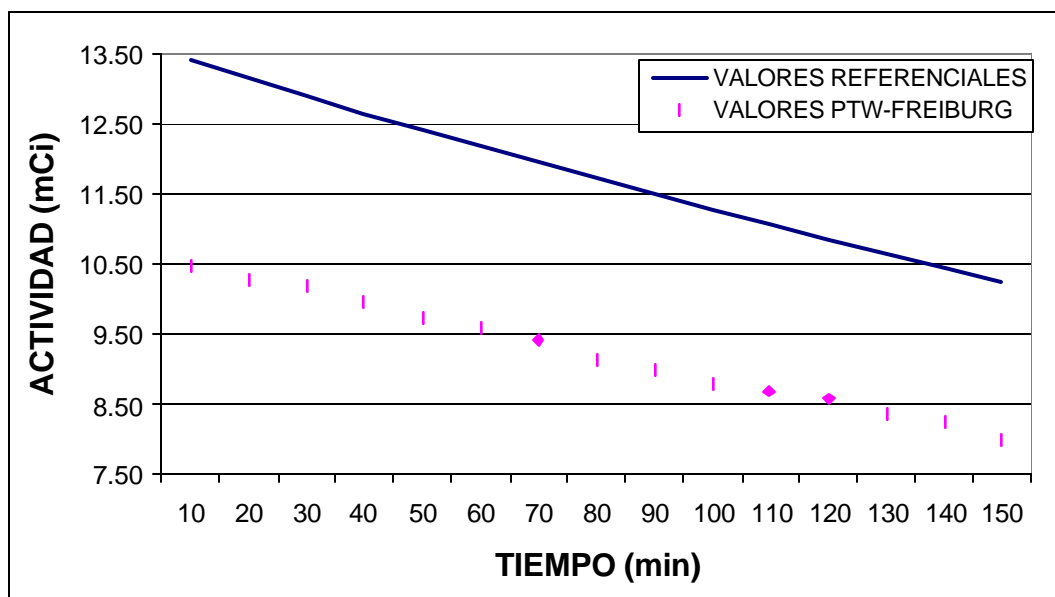


Fig. 6.2.4 Prueba de la Linealidad de la Respuesta a la Actividad, con una fuente de Tc-99m de 15 mCi en el Activímetro PTW-Freiburg Curiementor 3.

Luego se realizó una comparación de los Valores Corregidos de la linealidad de los dos Activímetros con los Valores Referenciales para cada fuente de Tc-99m utilizado, sin utilizar los factores de corrección (calibración y geometría) y luego aplicando los factores para verificar la respuesta de la Actividad de los equipos, el nivel de confianza estimado para el factor de geometría (Tabla 5.3) en el estudio de linealidad es del 95 %, según la Prueba estadística de Mann Whitney (ANEXO D2).

Los resultados obtenidos de la comparación de los Valores Referenciales con los Valores Corregidos de los dos Activímetros con una fuente de 30 mCi se muestran a continuación en la Tabla 6.2.5 y las Figuras 6.2.5 y 6.2.6.

Tabla 6.2.5 Valores Referenciales y Corregidos de la Linealidad de los dos Activímetros con la fuente de Tc-99m de 30 mCi.

VALORES REFERENCIALES (mCi)	VALORES CORREGIDOS DELUXE ISOTOPE (mCi)	VALORES CORREGIDOS PTW-FREIBURG (mCi)
29,600	29,683	29,573
29,036	28,986	28,889
28,482	28,485	28,618
27,939	28,083	27,851
27,406	27,482	27,314
26,883	26,880	27,276
26,371	26,178	26,241
25,868	25,877	25,743
25,374	25,275	25,232
24,891	24,974	24,964
24,416	24,372	24,248
23,950	23,871	23,814
23,494	23,470	23,405
23,046	23,069	23,047
22,606	22,667	22,460

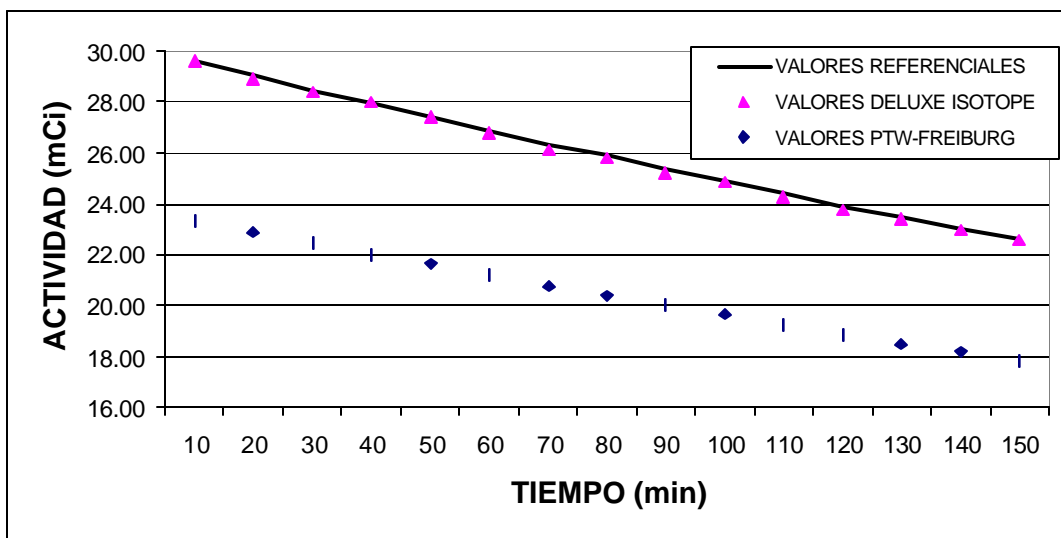


Fig. 6.2.5 Comparación de la Linealidad de la Respuesta a la Actividad del Activímetro Deluxe Isotope y el Activímetro PTW-Freiburg, con la fuente de Tc- 99m de 30 mCi, sin aplicar los factores de corrección.

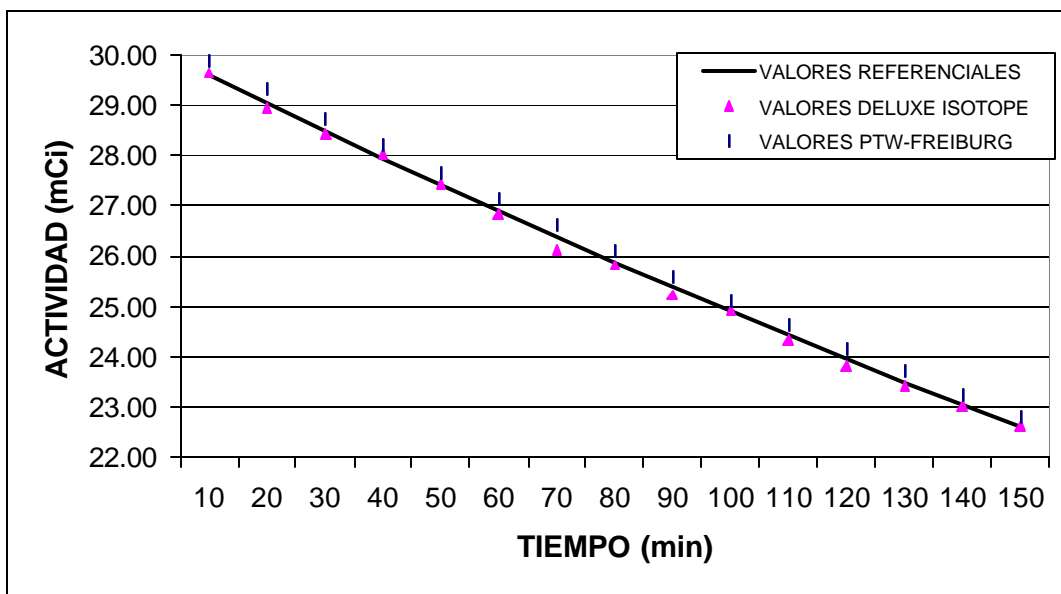


Fig. 6.2.6 Comparación de la Linealidad de la Respuesta a la Actividad de los Activímetros Deluxe Isotope y PTW_Freiburg, con la fuente de Tc-99m de 30 mCi, aplicando el factor de calibración y de geometría.

Los resultados obtenidos de la comparación de los Valores Referenciales con los Valores Corregidos de los dos Activímetros con una fuente de 15 mCi se muestran a continuación en la Tabla 6.2.6 y las Figuras 6.2.7 y 6.2.8.

Tabla 6.2.6 Valores Referenciales y Corregidos de la Linealidad de los dos Activímetros con la fuente de Tc-99m de 15 mCi.

VALORES REFERENCIALES (mCi)	VALORES CORREGIDOS DELUXE ISOTOPE (mCi)	VALORES CORREGIDOS PTW-FREIBURG (mCi)
13,410	13,450	13,376
13,154	13,109	13,121
12,903	12,878	13,018
12,657	12,618	12,723
12,416	12,317	12,433
12,179	12,136	12,263
11,947	11,885	12,027
11,719	11,725	11,694
11,496	11,474	11,484
11,276	11,243	11,263
11,061	10,943	11,108
10,850	10,792	10,951
10,644	10,622	10,682
10,441	10,411	10,513
10,241	10,220	10,205

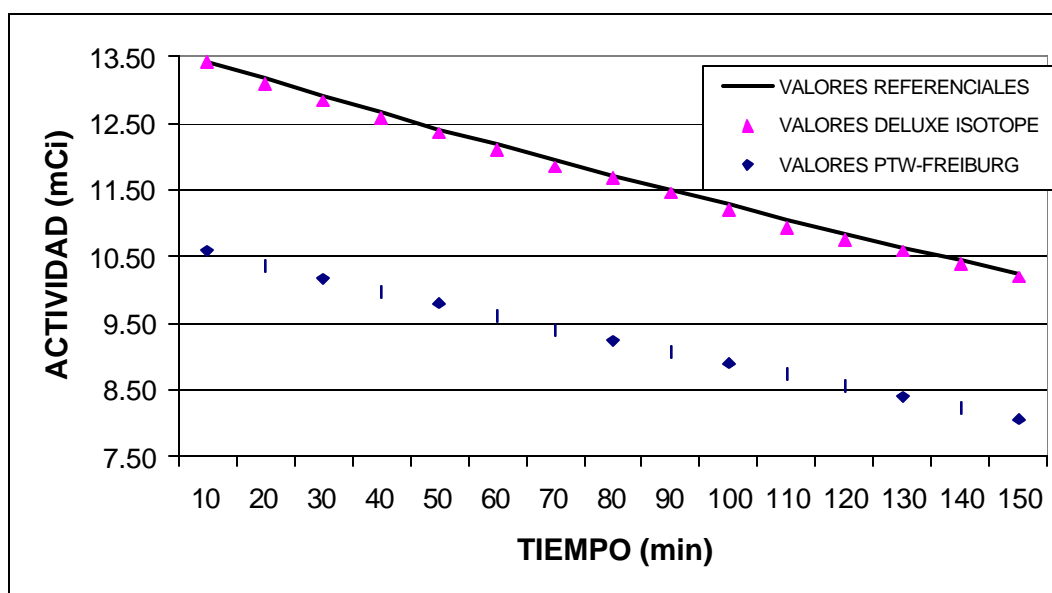


Fig. 6.2.7 Comparación de la Linealidad de la Respuesta a la Actividad del Activímetro Deluxe Isotope y el Activímetro PTW-Freiburg, con la fuente de Tc- 99m de 15 mCi, sin aplicar los factores de corrección.

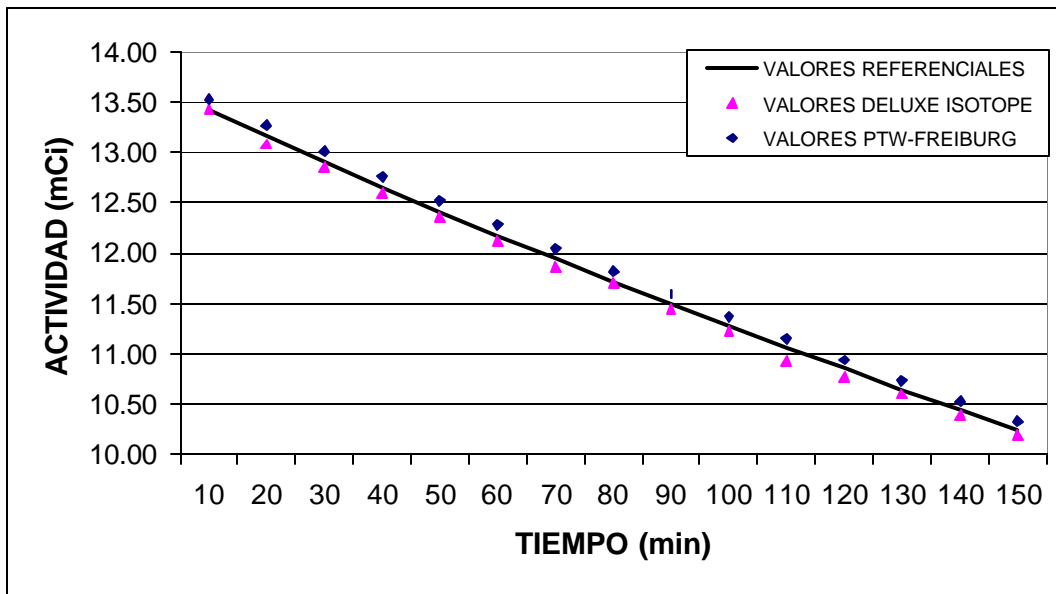


Fig. 6.2.8 Comparación de la Linealidad de la Respuesta a la Actividad de los Activímetros Deluxe Isotope y el PTW-Freiburg, con la fuente de Tc- 99m de 30 mCi, aplicando el factor de calibración y el factor de geometría.

6.3 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE LA RESPUESTA AL FONDO Y SENSIBILIDAD

Los resultados obtenidos para el caso del Deluxe Isotope calibrator II, no muestra una respuesta medible al fondo en condiciones de los Radioisótopos de Cr - 51 ó Xe - 133 debido a su emisión lenta de energía fotónica y al rango de lectura mínima que es de 0,001 mCi; a diferencia del PTW - Freiburg que si presenta una respuesta al fondo debido a que su medida de lectura mínima es de 0,001 μ Ci, cuyos valores experimentales se muestra en la Tabla 6.3. tanto para el caso del Cromo como para el Xenón.

Tabla 6.3 Valores Experimentales de la Prueba de la Respuesta al Fondo para los radioisótopos Cr - 51 y Xe - 133 para el PTW - Freiburg.

PERIODO 2005	PTW - FREIBURG	
	CROMO - 51 (μCi)	XENÓN - 133 (μCi)
ENERO	0,50 0,40	0,04 0,03
FEBRERO	0,60 0,30	0,03 0,02
MARZO	0,70 0,30	0,04 0,02
ABRIL	0,70 0,20	0,04 0,01
MAYO	0,30 0,10	0,02 0,01
JUNIO	0,60 0,50	0,04 0,03

Luego se realizó un estudio de sensibilidad de los dos Activímetros para llevar un control de forma sistemática para cualquier variación de fondo, mostrándose los resultados obtenidos en la Tabla 6.3.1 y 6.3.2; cuyas curvas se muestran en las Figura 6.3.1 y 6.3.2 .

Tabla 6.3.1 Valores Experimentales de la Sensibilidad del Activímetro Deluxe Isotope.

PERIODO 2005	DELUXE ISOTOPE CALIBRATOR II			
	<i>SENSIBILIDAD</i> $\text{Cesio} - 137 \pm m_s$ (μCi)		<i>SENSIBILIDAD</i> $\text{Bario} - 133 \pm m_s$ (μCi)	
ENERO	2,673	0,756	2,673	0,756
FEBRERO	2,635	0,874	2,033	0,674
MARZO	1,521	0,505	2,843	0,985
ABRIL	2,020	0,535	2,974	0,787
MAYO	1,633	0,516	2,000	0,632
JUNIO	2,264	0,751	2,335	0,775

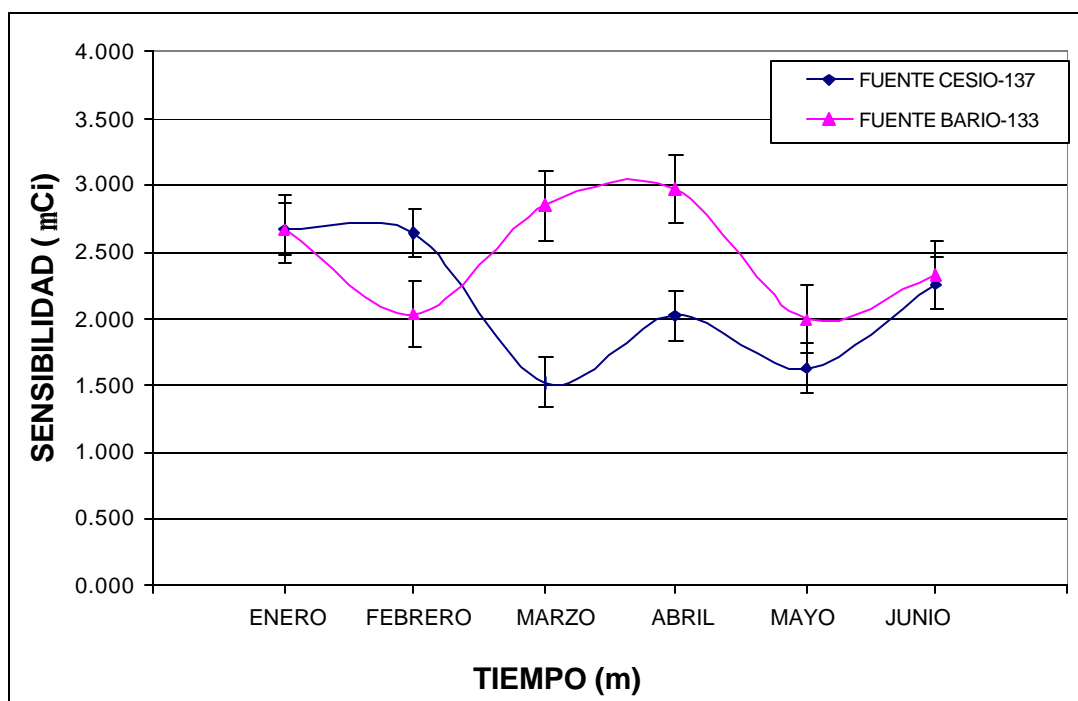


Fig. 6.3.1 Sensibilidad del Activímetro Deluxe Isotopo para la Fuente de Cesio-137 y para la Fuente de Bario-133.

Tabla 6.3.2 Valores Experimentales de la Sensibilidad del Activímetro PTW - Freiburg.

PERIODO 2005	PTW - FREIBURG CURIEMENTOR 3			
	<i>SENSIBILIDAD</i> <i>Cesio- 137</i> $\pm m_s$ (μ Ci)		<i>SENSIBILIDAD</i> <i>Bario - 133</i> $\pm m_s$ (μ Ci)	
ENERO	0,137	0,039	0,118	0,033
FEBRERO	0,100	0,033	0,059	0,020
MARZO	0,109	0,038	0,076	0,026
ABRIL	0,077	0,022	0,045	0,013
MAYO	0,052	0,016	0,035	0,011
JUNIO	0,048	0,016	0,052	0,017

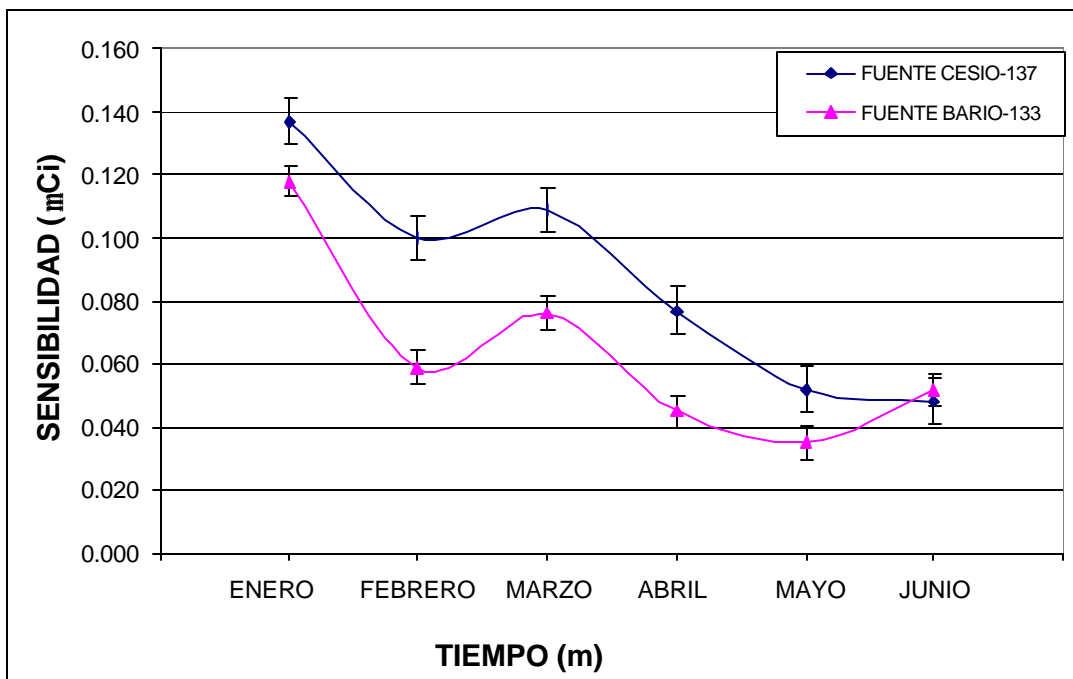


Fig. 6.3.2 Sensibilidad del Activímetro PTW-Freiburg para la Fuente de Cesio-137 y para la Fuente de Bario-133.

6.4 RESULTADOS DE LA VERIFICACIÓN DE LA REPRODUCIBILIDAD.

Las curvas para las fuentes de referencia de Cesio y de Bario para la Verificación de la Reproducibilidad fueron obtenidas a partir de las condiciones de la selección del selector del dial de los radioisotopos mas usados en el Departamento de Medicina Nuclear, como son el caso del Tecnecio - 99m y del Iodo - 131, cuyos valores experimentales para los equipos Deluxe Isotope Calibrator II y el PTW - Freiburg Curiementor 3, se muestran en la Tablas 6.4.1 y 6.4.2.

Luego las curvas son mostradas en las Fig. 6.4.1 , 6.4.2 , 6.4.3 y 6.4.4 para el caso del Deluxe Isotope Calibrator II y 6.4.5 , 6.4.6 , 6.4.7 y 6.4.8 para el PTW - Freiburg Curiementor 3.

La Tabla 6.4.1 muestra los valores de los últimos 3 datos tomados de cada mes durante el Periodo Marzo - Junio para el caso del Cesio - 137 y del Bario - 133 en condiciones del Tecnecio - 99m y del Iodo - 131 para el Activímetro Deluxe Isotope Calibrator II.

Tabla 6.4.1 Valores experimentales para el caso del Cesio y del Bario en condiciones de Tc - 99m y de I - 131 en el Deluxe Isotope Calibrator II.

PERIODO 2005	DELUXE ISOTOPE			
	TECNECIO - 99m (μCi)		IODO - 131 (μCi)	
	CESIO - 137	BARIO - 133	CESIO - 137	BARIO - 133
MARZO	294,0	508,0	218,0	379,0
	294,0	509,0	218,0	377,0
	295,0	508,0	220,0	377,0
ABRIL	295,0	507,0	219,0	377,0
	294,0	508,0	219,0	377,0
	294,0	507,0	219,0	377,0
MAYO	294,0	506,0	219,0	374,0
	294,0	504,0	219,0	374,0
	294,0	503,0	219,0	375,0
JUNIO	294,0	502,0	219,0	372,0
	293,0	502,0	219,0	372,0
	294,0	500,0	217,0	371,0

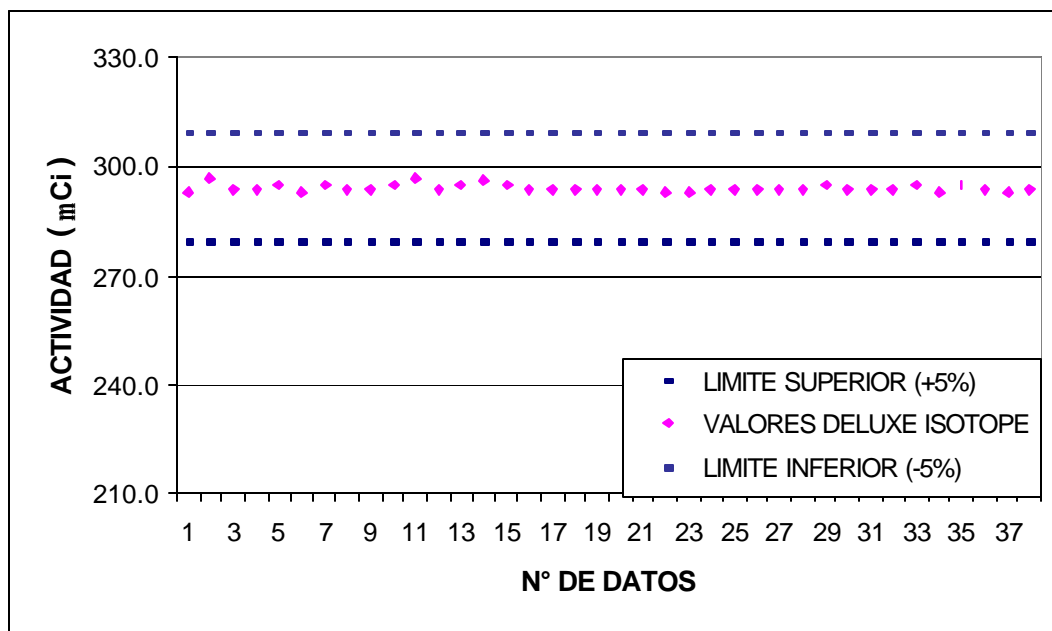


Fig. 6.4.1 Dispersión de la Verificación de la Reproducibilidad para el Deluxe Isotope en condiciones de Tc - 99m con la Fuente Cs - 137, obtenidos en el período de Marzo a Junio de 2005.

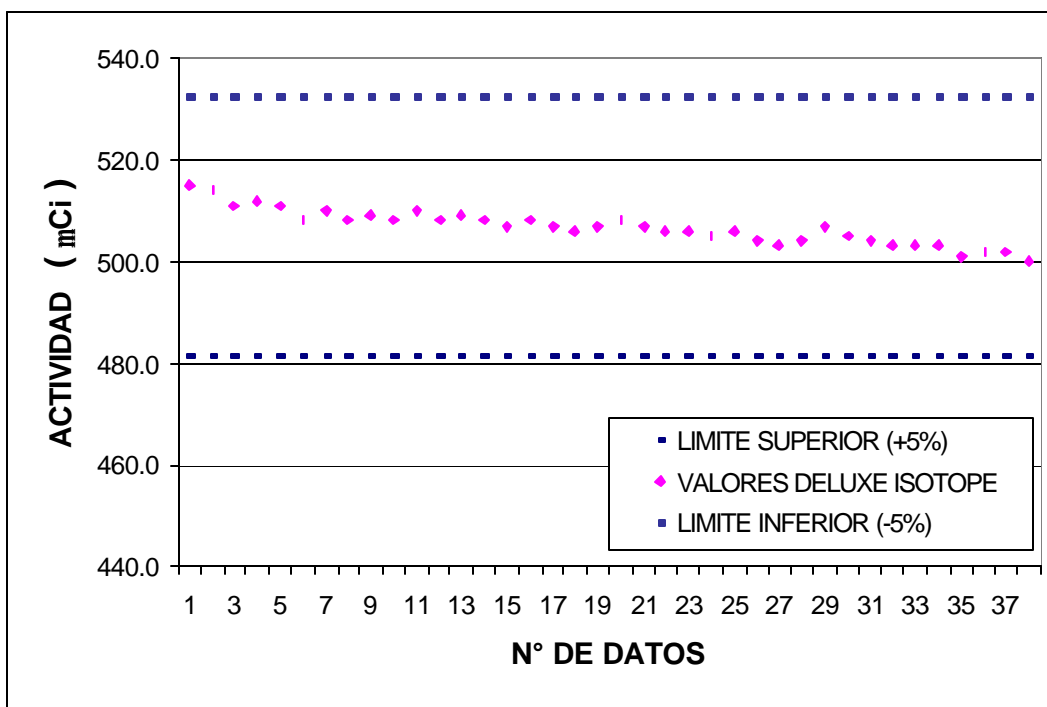


Fig. 6.4.2 Dispersión de la Verificación de la Reproducibilidad para el Deluxe Isotope en condiciones de Tc - 99m con la Fuente Ba – 133, obtenidos en el período de Marzo a Junio de 2005.

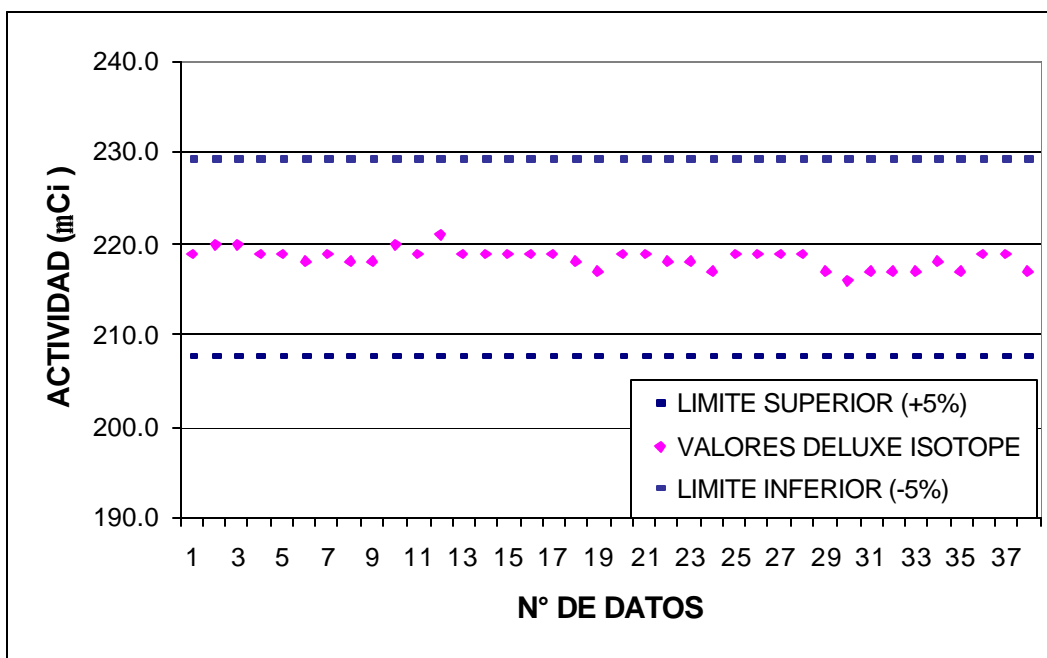


Fig. 6.4.3 Dispersión de la Verificación de la Reproducibilidad para el Deluxe Isotope en condiciones de I-131 con la Fuente Cs - 137, obtenidos en el período de Marzo a Junio de 2005.

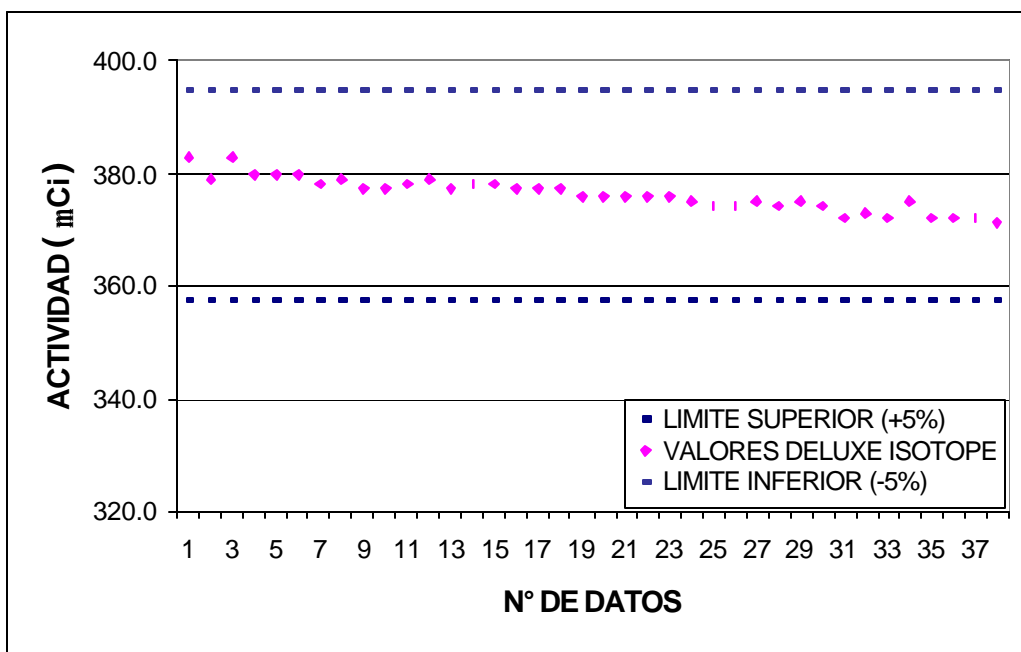


Fig. 6.4.4 Dispersión de la Verificación de la Reproducibilidad para el Deluxe Isotope en condiciones de I-131 con la Fuente Ba - 133, obtenidos en el período de Marzo a Junio de 2005.

La Tabla 6.4.2 muestra los valores de los últimos 3 datos tomados de cada mes durante el Periodo Marzo - Junio para el caso del Cesio - 137 y del Bario - 133 en condiciones del Tecnecio - 99m y del Iodo - 131 para el Activímetro PTW – Freiburg Curiementor 3.

Tabla 6.4.2 Valores experimentales para el caso del Cesio y del Bario en condiciones de Tc - 99m y de I - 131 en el PTW - Freiburg Curiementor 3.

PERIODO 2005	PTW – FREIBURG			
	TECNECIO - 99m (μCi)		IODO – 131 (μCi)	
	CESIO – 137	BARIO – 133	CESIO – 137	BARIO - 133
MARZO	311,06	420,36	199,11	269,61
	312,29	419,29	200,19	268,79
	312,32	418,32	199,55	267,05
ABRIL	311,41	415,81	199,94	266,54
	310,61	417,01	199,34	267,14
	311,28	416,58	199,88	266,98
MAYO	309,64	411,84	198,56	264,26
	309,56	412,56	198,58	264,68
	308,99	412,09	197,89	264,09
JUNIO	308,61	408,21	197,54	262,04
	307,13	409,43	196,95	262,35
	307,74	408,54	197,86	261,96

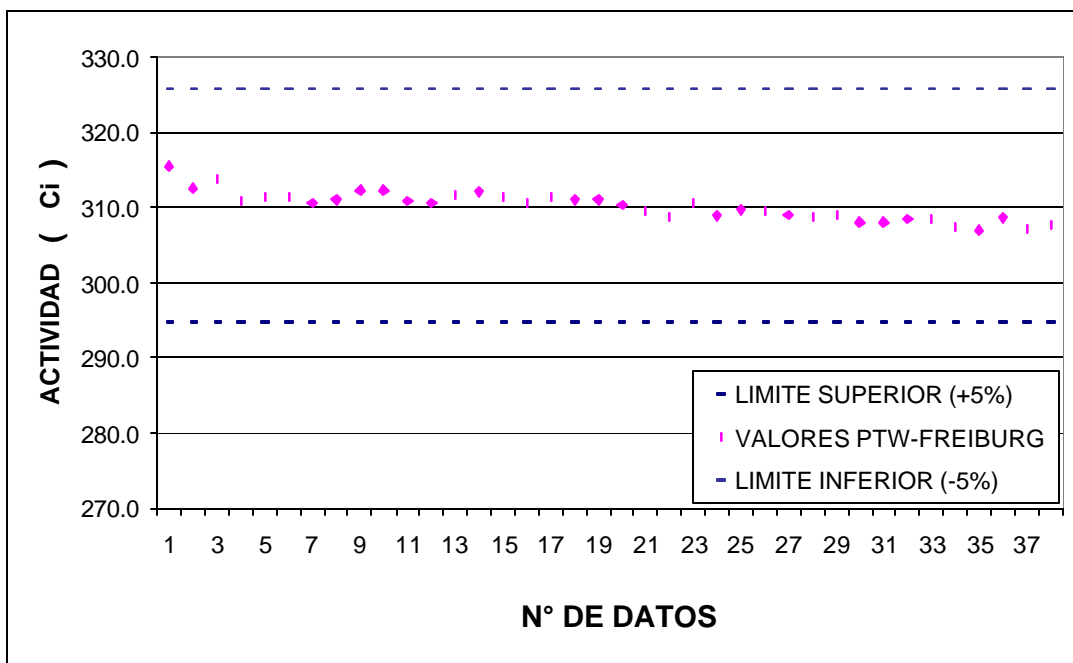


Fig. 6.4.5 Dispersión de la Verificación de la Reproducibilidad para el PTW-Freiburg en condiciones de Tc - 99m con la Fuente Cs - 137, obtenidos en el período de Marzo a Junio de 2005.

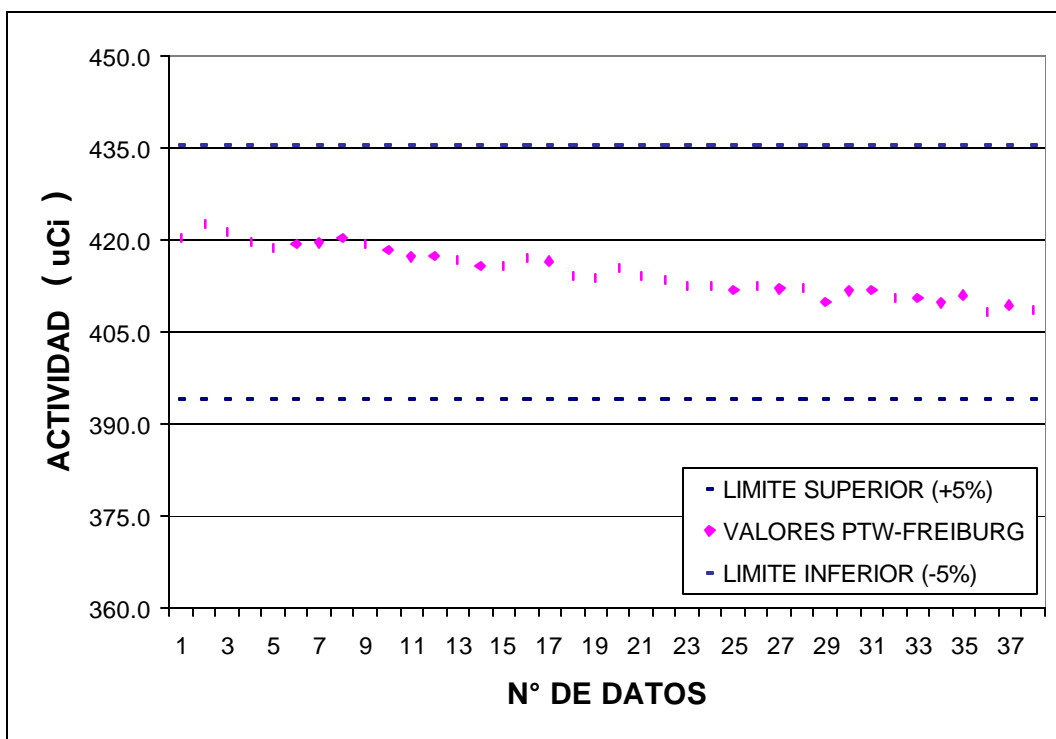


Fig. 6.4.6 Dispersión de la Verificación de la Reproducibilidad para el PTW-Freiburg en condiciones de Tc - 99m con la Fuente Ba - 133, obtenidos en el período de Marzo a Junio de 2005.

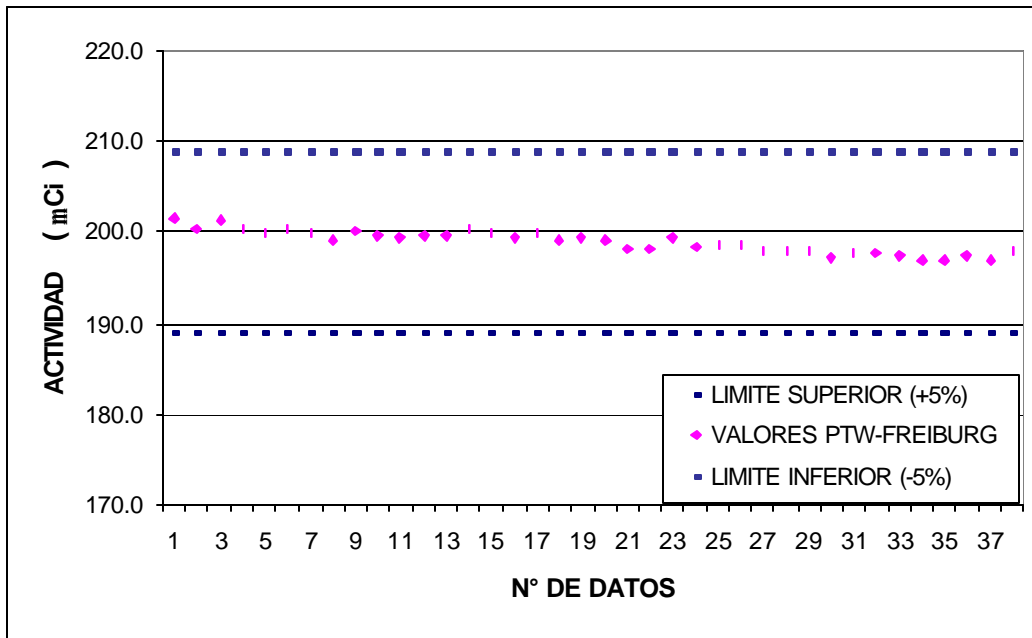


Fig. 6.4.7 Dispersión de la Verificación de la Reproducibilidad para el PTW-Freiburg en condiciones de I - 131 con la Fuente Cs - 137, obtenidos en el período de Marzo a Junio de 2005.

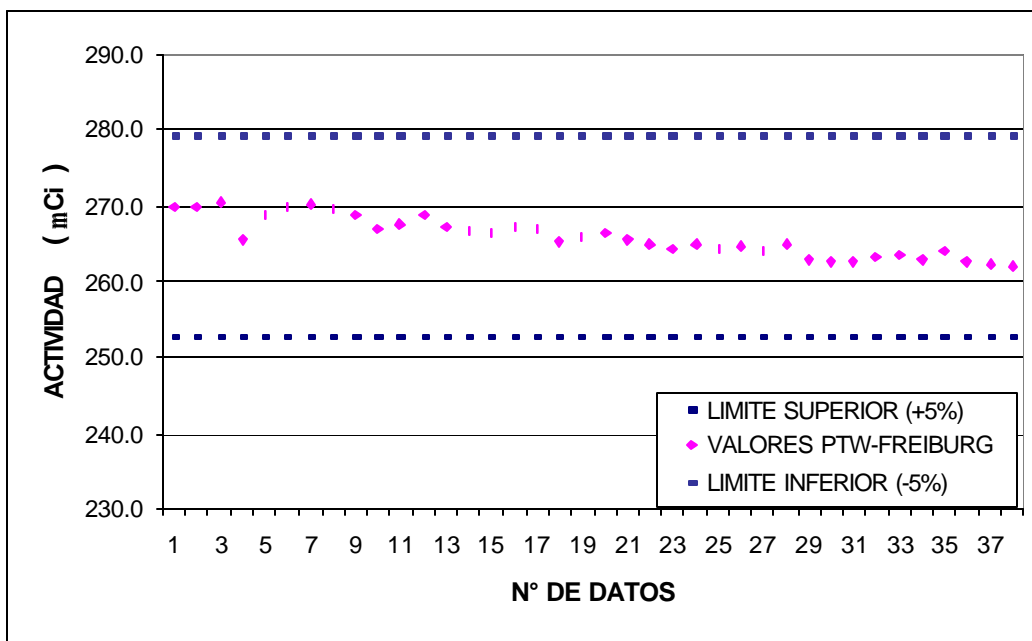


Fig. 6.4.8 Dispersión de la Verificación de la Reproducibilidad para el PTW-Freiburg en condiciones de I - 131 con la Fuente Ba - 133, obtenidos en el período de Marzo a Junio de 2005.

6.5 RESULTADOS DE LA VERIFICACIÓN DE LA RESPUESTA AL FONDO.

Los Resultados obtenidos en este estudio para los Activímetros Deluxe Isotope Calibrator II y el PTW - Freiburg Curiementor 3 nos permite verificar la Respuesta al Fondo en condiciones de los Radionúclidos más usados en el Departamento de Medicina Nuclear como el Tecnecio - 99m y el Iodo - 131. Los Valores Experimentales de los últimos 3 datos de cada mes se muestran en la Tabla 6.5 desde Marzo hasta Junio del año 2005.

Tabla 6.5 Valores Experimentales de la Verificación de La Respuesta al Fondo para el Deluxe Isotope y PTW -Freiburg para los radioisótopos Tc -99m y I - 131.

PERIODO 2005	DELUXE ISOTOPE		PTW – FREIBURG	
	TECNECIO - 99m (μ Ci)	ODO – 131 (μ Ci)	TECNECIO - 99m (μ Ci)	ODO – 131 (μ Ci)
MARZO	2,00	1,00	0,05	0,03
	3,00	1,00	0,01	0,01
	2,00	2,00	0,08	0,05
ABRIL	1,00	2,00	0,07	0,03
	2,00	1,00	0,09	0,06
	1,00	2,00	0,02	0,02
MAYO	1,00	1,00	0,04	0,03
	3,00	1,00	0,06	0,04
	2,00	1,00	0,04	0,02
JUNIO	2,00	1,00	0,07	0,03
	1,00	2,00	0,07	0,05
	1,00	2,00	0,06	0,04

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Realizado el estudio de estabilidad de los Activímetros se observó que el factor de calibración para el Deluxe Isotope Calibrator II y PTW-Freiburg mostraron una continuidad en la dispersión de sus datos dentro de los rangos 0,997 y 1,000 para el Deluxe Isotope y 1,095 y 1,112 para el PTW-Freiburg en el Período de estudio (Figuras 6.1.1 y 6.1.3); y una dispersión de la estabilidad promedio aceptable dentro de los límites de aceptación de $0,36 \pm 0,039$ para el Deluxe Isotope y $0,31 \pm 0,026$ para el Activímetro PTW-Freiburg (Figuras 6.1.2 y 6.1.4).

Para las Pruebas de Precisión y Exactitud fueron utilizadas dos fuentes de referencia de Cesio-137 y Bario-133, aplicándose el factor de calibración a ambos equipos para cada fuente. Los factores de calibración hallados son $0,997 \pm 0,004$ y $0,993 \pm 0,005$ para el Cesio-137 y Bario-133 respectivamente en el Activímetro Deluxe Isotope; y $1,109 \pm 0,004$ y $1,064 \pm 0,005$ para el Cesio-137 y Bario-133 en el Activímetro PTW-Freiburg (Tabla 5.1). Luego de aplicado el factor de calibración se obtuvo una precisión promedio de -0,281 % y un mejoramiento de la exactitud de 0,362 % a 0,068 % en el Activímetro Deluxe Isotope (Tabla 6.1.2) y en el PTW - Freiburg se obtuvo una precisión de -0,188 % y un notable mejoramiento de la exactitud de -9,601 % (límite de aceptación ± 10 %) a 0,078 % (Tabla 6.1.3).

En el Análisis del estudio de la linealidad de ambos Activímetros con dos fuentes de Tc-99m de 30 mCi y 15 mCi se tuvo en consideración un factor adicional al de calibración que fue el factor de geometría, debido a que no se uso las fuentes de referencia para la toma de datos, sino jeringuillas con el radioisótopo que se utilizan para la administración del radiofármaco al paciente.

El Factor de Geometría usado para el Deluxe Isotope Calibrator II y el PTW-Freiburg Curiementor 3 fueron $1,006 \pm 0,005$ y $1,152 \pm 0,005$ respectivamente. Los datos obtenidos para ambos Activímetros en la Prueba de Linealidad mostraron una línea casi recta con pendiente negativa comprobando el decaimiento del radioisótopo en el transcurso del tiempo, como se muestran en las Figuras 6.2.1, 6.2.2, 6.2.3, 6.2.4.

Sin embargo, al comparar los gráficos de linealidad del Deluxe Isotope y el PTW-Freiburg con la de referencia mostrados en la Figuras 6.2.5 y 6.2.7 se observa un claro alejamiento de los datos del Activímetro PTW-Freiburg con respecto a la línea recta de los datos de referencia, hecho ya antes visto en el estudio de los parámetros de estabilidad y exactitud del equipo; esto se mejoró considerablemente al aplicar los factores de corrección (factor de geometría) obteniendo un ajuste de los datos que llevaron a la obtención de datos muy cercanos a los de referencia, cuyas gráficas se muestran en las Figuras 6.2.6 y 6.2.8.

La Respuesta al fondo para el caso del Deluxe Isotope no se pudo determinar debido a la emisión lenta de energía fotónica de los radioisótopos seleccionados (Cr - 51 y Xe - 133) y al rango de su lectura mínima que es de 0,001 mCi, sin embargo para el PTW-Freiburg se obtuvo una respuesta promedio de $0,28 \mu\text{Ci} \pm 0,085 \mu\text{Ci}$ y $0,02 \mu\text{Ci} \pm 0,005 \mu\text{Ci}$ para el Cr-51 y Xe-133 respectivamente debido a que su medida de lectura mínima es de 0,001 μCi , cuyos valores experimentales se muestra en la Tabla 6.3.1 tanto para el Cromo como para el Xenón.

A pesar que no se puede determinar un límite específico para este estudio, un aumento del 20 % o más requiere una investigación más cuidadosa, por este motivo, se realizó un estudio de sensibilidad con el fin de obtener la mínima actividad medible de los equipos utilizando las fuentes de referencia de Cs-137 y Ba-133, tomando en consideración las incertidumbres de la respuesta al fondo en la determinación de las curvas de sensibilidad de los Activímetros para ambas fuentes mostrados en las Figuras 6.3.1 y 6.3.2.

Se obtuvo la sensibilidad de la respuesta de los Activímetros en rangos comprendidos entre $1,521 \mu\text{Ci} \pm 0,505 \mu\text{Ci}$ y $2,673 \mu\text{Ci} \pm 0,756 \mu\text{Ci}$ para el caso del Cs-137 y rangos comprendidos entre $2,000 \mu\text{Ci} \pm 0,632 \mu\text{Ci}$ y $2,974 \mu\text{Ci} \pm 0,787 \mu\text{Ci}$ para el Ba-133 en el Deluxe Isotope (Tabla 6.3.1). Luego para el PTW-Freiburg $0,109 \mu\text{Ci} \pm 0,011 \mu\text{Ci}$ y $0,048 \mu\text{Ci} \pm 0,005 \mu\text{Ci}$ para el caso del Cs-137 y $0,035 \mu\text{Ci} \pm 0,011 \mu\text{Ci}$ y $0,118 \mu\text{Ci} \pm 0,033 \mu\text{Ci}$ para el Ba-133 (Tabla 6.3.2).

En la estimación de la dispersión realizada para la Prueba de la Verificación de la Reproducibilidad se obtuvo una dispersión de datos dentro de los límites de aceptación de $\pm 5 \%$ para ambos Activímetros para cada fuente de referencia mostrados en las Figuras 6.4.1 , 6.4.2 , 6.4.3 y 6.4.4 para el Deluxe Isotope y 6.4.5 , 6.4.6 , 6.4.7 y 6.4.8 para el PTW-Freiburg ; se registró los resultados correlacionando la actividad aparente con el mes en que la lectura fue tomada; como las condiciones seleccionadas para la operación del Deluxe Isotope Calibrator II y PTW-Freiburg Curiementor 3 no fueron las adecuadas para el radionúclido integrante de la fuente, la actividad difirió mucho de la actividad verdadera, pero se debe tomar en cuenta que el objetivo de la Prueba de la Verificación de la Reproducibilidad es la verificación la reproducibilidad del instrumento bajo las condiciones de operación seleccionadas y no la comprobación de la medida de la actividad real dada por el equipo, de esta manera se comprueba la verificación del desempeño de los Activímetros.

Además de la Prueba de Respuesta al Fondo y la necesidad de un estudio de sensibilidad del Activímetro, se realizó una Prueba de Verificación de respuesta al fondo en condiciones de los radionúclidos más usados en el departamento como el Tc-99m y el I-131, tanto para el Deluxe Isotope Calibrator II como para el PTW-Freiburg, de esta manera se determinó el incremento en el background o fondo de radiación en el período en que se realizó el estudio para indicar una contaminación radiactiva en el equipo, obteniéndose una respuesta aceptable entre los rangos de $1 \mu\text{Ci}$ a $3 \mu\text{Ci}$ para el Deluxe Isotope y $0,01 \mu\text{Ci}$ a $0,08 \mu\text{Ci}$ para el caso del PTW-Freiburg (Tabla 6.5).

C. CONCLUSIONES

1. La aplicación de los factores de calibración para el Activímetro Deluxe Isotope $0,997 \pm 0,004$ y $1,109 \pm 0,004$ para el caso del PTW-Freiburg en los cálculos de la precisión y exactitud en los equipos ha permitido visualizar un real mejoramiento en la medida de la lectura de los equipos a un nivel de confianza del 98 % por la Prueba Estadística de Mann-Whitney.
2. Para el caso del Activímetro PTW-Freiburg se recomienda aplicar el factor de calibración al propio sistema del equipo, ya que a pesar del mejoramiento de la lectura después de aplicado el factor de calibración con un nivel de confianza del 98 %; antes de aplicado dicho factor mostraba una exactitud por encima del 10 % en comparación con el Activímetro Deluxe Isotope que antes de aplicado el factor solo mostraba una exactitud máxima del 1,25 %.
3. El factor de geometría aplicado en este estudio para las pruebas de linealidad a un nivel de confianza del 95 % fue de $1,006 \pm 0,005$ para el Activímetro Deluxe Isotope y de $1,152 \pm 0,005$ para el caso del PTW-Freiburg permitiendo demostrar la importancia de este factor, ya que solo la variación de la geometría del contenedor (viales, jeringuillas, etc.) del material o la posición y dimensiones de este puede mostrar un cambio notable en la medida de la lectura, sobre todo en cámaras de ionización de tipo pozo de poca profundidad, como el caso del Activímetro PTW-Freiburg.
4. Por no poderse realizar una Prueba de Respuesta al Fondo, para el Activímetro Deluxe Isotope debido a los radioisótopos seleccionados necesarios para esta prueba por su emisión lenta de energía fotónica como el Cr - 51 y el Xe - 133, debido al rango de lectura mínima del equipo que es de 0,001 mCi, se recomienda realizar pruebas de sensibilidad, que para el caso del Deluxe Isotope arrojó un resultado satisfactorio entre $1,521 \mu\text{Ci} \pm 0,152 \mu\text{Ci}$ y $2,264 \mu\text{Ci} \pm 0,226 \mu\text{Ci}$ para el caso del Cs-137; y $2,843 \mu\text{Ci} \pm 0,284 \mu\text{Ci}$ y $2,335 \mu\text{Ci} \pm 0,234 \mu\text{Ci}$ para el Ba-133.

5. A pesar de que para el PTW-Freiburg si se puede realizar la Prueba de Respuesta al Fondo debido a su rango de lectura mínima que es de $0,001 \mu\text{Ci}$, también se recomienda realizar un estudio de sensibilidad para poder establecer la mínima actividad medible, como en el caso del Activímetro Deluxe Isotope, los resultados fueron entre los rangos de $0,109 \mu\text{Ci} \pm 0,011 \mu\text{Ci}$ y $0,048 \mu\text{Ci} \pm 0,005 \mu\text{Ci}$ para el caso del Cs-137 y $0,076 \mu\text{Ci} \pm 0,008 \mu\text{Ci}$ y $0,052 \mu\text{Ci} \pm 0,005 \mu\text{Ci}$ para el Ba-133.
6. La dispersión de datos obtenidos en las pruebas de Verificación de la Reproducibilidad se encuentran dentro de los límites de aceptación de $\pm 5 \%$ para ambos Activímetros, para cada fuente de referencia en la prueba, descartando de esta manera cualquier tipo de imprecisión (error al azar) o sesgo (errores sistemáticos) en los Activímetros Deluxe Isotope Calibrator II y PTW-Freiburg Curiementor 3.
7. Es necesario, además de realizar una prueba de respuesta al fondo y un estudio de sensibilidad, la realización de una prueba de Verificación de Respuesta al Fondo diaria, en condiciones de los radionúclidos más usados en el departamento (Tc-99m y I-131) , para de esta manera poder determinar el background, debido a que se puede producir contaminación en el Activímetro o un aumento de la radiación debido a material radiactivo presente en el cuarto caliente; obteniéndose de esta manera una medida de la lectura alejada de la actividad real de la que se desea medir; teniendo como consecuencia una sobreirradiación del paciente o una mala calidad de imagen que no pueda determinar un buen diagnóstico.
8. Se recomienda utilizar el Test o Prueba de Mann Whitney para determinar el nivel de confianza de los factores de corrección, ya que permite calcular la distribución normal de dos poblaciones independientes (datos referenciales y datos corregidos) y el nivel de significación de los factores de corrección sobre los datos experimentales para lograr un acercamiento a los datos referenciales.

9. El estudio de los parámetros de calibración de Activímetros en Medicina Nuclear muestra la importancia del Control de Calidad de estos equipos, la necesidad del estudio de parámetros como Estabilidad y Sensibilidad para un mejor control y la aplicación de factores de corrección para una mejor exactitud en la medida, con el fin de poder garantizar la eficacia y confiabilidad del Activímetro al momento de medir la actividad del radioisótopo, ya que luego éste será administrado al paciente.

D. ANEXO

D1. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE

1. INCERTIDUMBRE DE UNA MEDIDA

La Incertidumbre de una Medida es un parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que pueden atribuirse razonablemente al mensurando (magnitud concreta objeto de la medición).

Incertidumbre Tipo A: Es el método de evaluar la incertidumbre mediante el análisis estadístico de una serie de observaciones.

$$m_q = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \quad (\text{Incertidumbre Típica Experimental})$$

donde: $\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k$ y q_k serie de observaciones

Incertidumbre Tipo B: Es el método de evaluar la incertidumbre mediante un procedimiento distinto al análisis estadístico de una serie de observaciones, por ejemplo datos obtenidos en mediciones anteriores, especificaciones de los fabricantes, datos obtenidos de calibraciones y otros certificados, etc.

$$m_{q_i} = \frac{a_+ + a_-}{\sqrt{12}} \quad (\text{Incertidumbre Típica Experimental})$$

donde: $q_i = \frac{1}{2}(a_+ + a_-)$ y a_{\pm} límites para el valor de la medida.

Expresión general del Cálculo de Incertidumbre

La incertidumbre se propaga a toda magnitud que se derive a partir de una magnitud medida directamente. Supongamos que una magnitud física depende funcionalmente de otras:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

De cada una de estas magnitudes x_i se determinan experimentalmente los valores medidos y sus incertidumbres m_{xi} .

$$m_y^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \bigg|_{x_i = x_i} m_{x_i}^2$$

2. CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DEL FACTOR DE CALIBRACIÓN Y DEL FACTOR DE GEOMETRÍA

Según la Ley general del Cálculo de Incertidumbres tenemos que la Incertidumbre del Factor de Calibración $f = \frac{A}{d-b}$ es:

$$m_f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial A} \right)^2 m_A^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial d} \right)^2 m_d^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b} \right)^2 m_b^2$$

Operando tenemos:

$$m_f = \sqrt{\left(\frac{1}{(d-b)} \right)^2 m_A^2 + \left(\frac{A}{(d-b)^2} \right)^2 (m_d^2 + m_b^2)}$$

Igualmente la Incertidumbre del Factor de Geometría $g = p \frac{(c-b)}{(d-b)}$, según la Ley general del Cálculo de Incertidumbres es:

$$m_g^2 = \left(\frac{\partial g}{\partial p} \right)^2 m_p^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial c} \right)^2 m_c^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial d} \right)^2 m_d^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial b} \right)^2 m_b^2$$

Operando tenemos:

$$m_g = \sqrt{\left(\frac{c-b}{d-b} \right)^2 m_p^2 + \left(\frac{p}{d-b} \right)^2 m_c^2 + \left(\frac{p \cdot (c-b)}{(d-b)^2} \right)^2 m_d^2 + \left(\frac{p \cdot (c-d)}{(d-b)^2} \right)^2 m_b^2}$$

donde:

$$m_p = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial m_t} \right)^2 m_{mt}^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial m_A} \right)^2 m_{mA}^2}$$

$$m_p = \sqrt{\left(\frac{1}{m_A} \right)^2 (m_{mjA'}^2 + m_{mj}^2) + \left(\frac{m_t}{m_A^2} \right)^2 m_{mA}^2}$$

3. CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE LA MEDIDA DE LA ACTIVIDAD DE UNA FUENTE

El proceso de medida de la actividad de una fuente consta de los siguientes pasos:

- La colocación de la fuente en la posición de medida en el interior del activímetro.
- La medida del valor de actividad indicado por el activímetro.
- La corrección del resultado por el fondo radiactivo.

- d) La corrección del valor neto por el factor de calibración.
- e) La corrección por el factor de geometría cuando la geometría de la medida no sea la definida como "geometría de referencia" en el proceso de calibración.
- f) El cálculo de la incertidumbre del resultado.

La actividad A de la fuente vendrá dada por la expresión:

$$A = (d - b) \cdot f_c = (d - b) \cdot f \cdot g$$

donde:

d es la lectura indicada por el activímetro sin descontar el fondo.

b es el valor del fondo.

f_c es el factor de calibración corregido por geometría.

f es el factor de calibración para la geometría de referencia.

g es el factor de corrección para la geometría de la medida ($g = 1$ para la geometría de referencia).

La incertidumbre típica combinada del resultado (m_A) se obtiene a partir de sus componentes mediante la expresión general de cálculo de incertidumbres.

$$m_A^2 = \left(\frac{\partial A}{\partial d} \right)^2 m_d^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial b} \right)^2 m_b^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial f} \right)^2 m_f^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial g} \right)^2 m_g^2$$

donde m_d , m_b , m_f y m_g son las incertidumbres típicas del valor indicado d , del fondo b , del factor de calibración f y del factor de geometría g respectivamente.

Desarrollando esta expresión se llega a:

$$m_A = \sqrt{(f \cdot g)^2 [m_d^2 + m_b^2] + [(d - b) \cdot g]^2 m_f^2 + [(d - b) \cdot f]^2 m_g^2}$$

El Cálculo de la Incertidumbre m_f del factor de calibración y m_g del factor de geometría fueron determinados en el punto 2.

La incertidumbre m_d del valor indicado se obtiene a partir de la combinación cuadrática de las varianzas de sus componentes:

$$m_d = \sqrt{m_r^2 + m_l^2 + m_e^2}$$

Repetibilidad de la medida (m_r)

Su valor se determina realizando una serie de medidas consecutivas y calculando la desviación estándar de la media de la serie:

$$m_r = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (z_k - \bar{z})^2}$$

Resolución del visor digital (m_l)

Si la resolución del indicador digital, entendida como la unidad del dígito menos significativo, es **DA** la incertidumbre típica debida a este efecto es la que se deriva de una distribución de probabilidad rectangular:

$$m_l = \sqrt{\frac{(\Delta A)^2}{12}} = \frac{\Delta A}{\sqrt{12}}$$

Factor de estabilidad a largo plazo (m_e)

La componente asociada se calculará a partir de las medidas obtenidas con la fuente de referencia. Se determinará en primer lugar el valor de la componente correspondiente a las medidas de referencia y se estimará a continuación su repercusión en una medida cualquiera.

Para el cálculo de la incertidumbre que se deriva de la estabilidad a largo plazo existen varias alternativas; la forma más directa de estimarla es a partir de la desviación estándar de la serie de medidas Z_k realizadas con la fuente de referencia:

$$m_Z = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (z_k - \bar{z})^2}$$

En esta expresión Z_k representa el conjunto de medidas realizadas con la fuente y Z el valor medio obtenido, corregido por decaimiento. La incertidumbre típica relativa debida al factor de estabilidad será:

$$m_{Z_r} = \frac{m_Z}{Z}$$

Se puede calcular ahora la componente debida a la estabilidad para el caso de la medida de la muestra problema. En primera aproximación, la incertidumbre relativa sobre el valor d medido será igual a la correspondiente a la fuente de constancia, por lo que la incertidumbre típica sobre d debida a este efecto se podrá calcular como:

$$m_e = m_{e_r} \cdot d \approx m_{Z_r} \cdot d = d \cdot \frac{m_Z}{Z}$$

La Incertidumbre debida a la Variación del Fondo Radiactivo **m_b** , se determina a partir de la desviación estándar de la media del conjunto de medidas realizadas para determinarlo:

$$m_b = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (b_k - \bar{b})^2}$$

Conocidos el valor de la actividad A y el de la incertidumbre típica combinada **m_A** , el resultado obtenido se expresará como:

$$A \pm k \cdot m_A$$

detallando el valor de **k** que se ha utilizado ^[3,5].

D2. TEST DE MANN - WHITNEY

También llamada Prueba U de Mann-Whitney

1. SUPUESTOS

- a. Se toman dos muestras aleatorias (Muestra 1: Datos Teóricos y Muestra 2: Datos Experimentales), una de cada población de tamaños n_1 y n_2 .
- b. La variable observada es continua.
- c. La escala de medida es al menos nominal.
- d. Las distribuciones de ambas poblaciones si difieren lo hacen sólo en posición.

2. HIPÓTESIS

H_0 : Las medianas de ambas poblaciones son iguales. El Factor de Corrección influye significativamente.

H_1 : Las medianas de ambas poblaciones son diferentes. El Factor de Corrección no influye significativamente.

3. ESTADÍSTICO DE PRUEBA

Para calcular el estadístico de prueba unimos las dos muestras combinándolas y ordenándolas de menor a mayor y asignamos rangos a los datos ordenados. Sea:

S = Suma de los rangos de los datos de la muestra 1.

El Estadístico de Prueba es:

$$T = S - \frac{n_1(n_1 + 1)}{2}$$

4. CRITERIO DE DECISIÓN

Tenemos: α = nivel de significación.

$1 - \alpha$ = nivel de confianza.

Para la Hipótesis: Obtenemos $W_{1-\alpha/2}$ de la Tabla de Mann-Whitney^[13],

$$W_{1-\alpha/2} = n_1 n_2 - W_{\alpha/2}$$

Se rechaza H_0 ; si $T < W_{\alpha/2}$ ó $T > W_{1-\alpha/2}$

5. APROXIMACIÓN PARA DOS MUESTRAS GRANDES

Si n_1 ó n_2 son mayores que 20, podemos utilizar la aproximación.

Entonces el estadístico de prueba será:

$$Z_c = \frac{T - \frac{n_1 n_2}{2}}{\sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}}}$$

Si se tienen empates se usará la siguiente corrección:

El denominador de Z_c se reemplaza por:

$$\sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12} - \frac{n_1 n_2 (\sum t^3 - \sum t)}{12(n_1 + n_2)(n_1 + n_2 - 1)}}$$

Lo que sería igual a:

$$Z_c = \frac{T - \frac{n_1 n_2}{2}}{\sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12} - \frac{n_1 n_2 (\sum t^3 - \sum t)}{12(n_1 + n_2)(n_1 + n_2 - 1)}}}$$

Donde:

t = Número de empates para un rango dado.

Se rechaza H_0 ; si $Z_c > F(x)$

Donde $F(x)$ se obtiene de la Tabla de Normalidad de Mann-Whitney^[13].

6. VALORES DE $W_{a/2}$ y $F(x)$

Según la Tabla de Mann-Whitney tenemos:

Nivel de Confianza al 95 %.

$$W_{a/2} = 65,00$$

$$F(x) = 1,65$$

Nivel de Confianza al 98 %.

$$W_{a/2} = 57,00$$

$$F(x) = 2,06$$

ANÁLISIS DE LOS DATOS POR EL METODO DE MANN-WHITNEY (FACTOR DE CALIBRACIÓN)

1. ACTIVIMETRO DELUXE ISOTOPE CALIBRATOR II

Octubre – Diciembre 2004

	PROMEDIO	Nº DE DATOS	DESVIACION ESTANDAR
VALOR REFERENCIAL	172,110	33	0,279
VALOR CORREGIDO	172,110	33	0,704
TOTAL		66	

ESTADISTICO DE CONTRASTE	VALORES
S	1098
T	537
t	1, 2
Z_c	0,096

Enero – Marzo 2005

	PROMEDIO	Nº DE DATOS	DESVIACION ESTANDAR
VALOR REFERENCIAL	171,174	30	0,250
VALOR CORREGIDO	171,172	30	0,814
TOTAL		60	

ESTADISTICO DE CONTRASTE	VALORES
S	932
T	467
t	1
Z_c	0,251

Abril – Junio 2005

	PROMEDIO	Nº DE DATOS	DESVIACION ESTANDAR
VALOR REFERENCIAL	169,373	28	0,722
VALOR CORREGIDO	169,370	28	0,823
TOTAL		56	

ESTADISTICO DE CONTRASTE	VALORES
S	807
T	401
t	1
Z_c	0,147

2. ACTIVIMETRO PTW-FREIBURG

Octubre – Diciembre 2004

	PROMEDIO	Nº DE DATOS	DESVIACION ESTANDAR
VALOR REFERENCIAL	172,211	33	0,279
VALOR CORREGIDO	172,212	33	0,104
TOTAL		66	

ESTADISTICO DE CONTRASTE	VALORES
S	807
T	523
t	1, 2, 3, 4, 5
Z_c	0,270

Enero – Marzo 2005

	PROMEDIO	Nº DE DATOS	DESVIACION ESTANDAR
VALOR REFERENCIAL	171,174	32	0,046
VALOR CORREGIDO	171,175	32	0,099
TOTAL		64	

ESTADISTICO DE CONTRASTE	VALORES
S	954
T	426
t	1, 2, 3, 4, 5
Z_c	1,150

Abril – Junio 2005

	PROMEDIO	Nº DE DATOS	DESVIACION ESTANDAR
VALOR REFERENCIAL	169,373	29	0,137
VALOR CORREGIDO	169,372	29	0,190
TOTAL		58	

ESTADISTICO DE CONTRASTE	VALORES
S	965
T	530
t	1
Z_c	1,700

ANÁLISIS DE LOS DATOS POR EL METODO DE MANN-WHITNEY (FACTOR DE GEOMETRÍA)

1. ACTIVIMETRO DELUXE ISOTOPE CALIBRATOR II

	PROMEDIO	Nº DE DATOS	DESVIACION ESTANDAR
VALOR REFERENCIAL	25,957	15	2,234
VALOR CORREGIDO	25,957	15	2,250
TOTAL		30	

ESTADISTICO DE CONTRASTE	VALORES
S	232
T	112
α	0,05
$\alpha/2$	0,025
$W_{1-\alpha/2}$	160

2. ACTIVIMETRO PTW-FREIBURG

	PROMEDIO	Nº DE DATOS	DESVIACIÓN ESTANDAR
VALOR REFERENCIAL	25,957	15	2,234
VALOR CORREGIDO	25,910	15	2,269
TOTAL		30	

ESTADISTICO DE CONTRASTE	VALORES
S	237
T	117
α	0,05
$\alpha/2$	0,025
$W_{1-\alpha/2}$	160

D3. DATOS EXPERIMENTALES

DATOS DELUXE ISOTOPE CALIBRATOR II

MES OCTUBRE 2004	DELUXE ISOTOPE							
	CESIO - 137				BARIO - 133			
	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)
	172,67	172	171,48	2,00	137,46	141	138,46	0,00
	172,64	172	171,48	2,00	137,39	141	138,46	1,00
	172,62	173	172,48	0,00	137,34	140	137,48	1,00
	172,56	173	172,48	1,00	137,22	141	138,46	0,00
	172,54	174	173,48	0,00	137,17	141	138,46	0,00
	172,52	173	172,48	1,00	137,12	140	137,48	0,00
	172,49	173	172,48	0,00	137,05	140	137,48	0,00
	172,47	173	172,48	1,00	137,00	141	138,46	0,00
	172,44	173	172,48	1,00	136,95	140	137,48	1,00
	172,41	174	173,48	0,00	136,88	137	134,53	0,00
	172,39	174	173,48	0,00	136,83	137	134,53	0,00
	172,37	172	171,48	0,00	136,78	137	134,53	0,00
PROMEDIO	172,54	173,0	172,48	0,667	137,10	139,7	137,15	0,250
INCERTID.		0,213	1,036	0,228		0,482	1,874	0,139

MES NOVIEMBRE 2004	DELUXE ISOTOPE							
	CESIO - 137				BARIO - 133			
	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)
	172,31	174	173,30	1,00	136,66	137	136,32	0,00
	172,29	172	171,31	1,00	136,61	137	136,32	1,00
	172,26	174	173,30	0,00	136,54	137	136,32	0,00
	172,24	173	172,31	0,00	136,49	137	136,32	0,00
	172,22	172	171,31	1,00	136,44	137	136,32	1,00
	172,18	173	172,31	0,00	136,37	137	136,32	0,00
	172,16	173	172,31	0,00	136,32	137	136,32	2,00
	172,14	173	172,31	0,00	136,27	137	136,32	0,00
	172,11	173	172,31	0,00	136,20	137	136,32	0,00
	172,09	173	172,31	0,00	136,15	138	137,31	1,00
	172,06	173	172,31	0,00	136,10	137	136,32	0,00
	172,03	172	171,31	0,00	136,03	137	136,32	0,00
PROMEDIO	172,17	172,9	172,23	0,250	136,35	137,1	136,40	0,417
INCERTID.		0,193	0,986	0,131		0,083	0,625	0,193

MES DICIEMBRE 2004	DELUXE ISOTOPE							
	CESIO - 137				BARIO - 133			
	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)
	172,01	173	172,14	2,00	135,98	137	136,32	0,00
	171,99	172	171,14	1,00	135,94	137	136,32	1,00
	171,95	173	172,14	1,00	135,86	137	136,32	1,00
	171,91	173	172,14	2,00	135,77	136	135,32	0,00
	171,88	173	172,14	1,00	135,69	136	135,32	1,00
	171,80	173	172,14	2,00	135,53	136	135,32	0,00
	171,78	173	172,14	0,00	135,48	136	135,3 2	0,00
	171,73	172	171,14	0,00	135,36	136	135,32	1,00
	171,70	172	171,14	0,00	135,31	136	135,32	0,00
PROMEDIO	171,86	172,7	171,80	1,000	135,66	136,3	135,65	0,444
INCERTID.		0,167	0,868	0,289		0,167	0,759	0,176

MES ENERO 2005	DELUXE ISOTOPE							
	CESIO - 137				BARIO - 133			
	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)
	171,55	172	172,00	1,00	134,97	135	134,19	1,00
	171,53	172	172,00	2,00	134,93	136	135,18	0,00
	171,48	171	171,00	1,00	134,81	136	135,18	0,00
	171,45	171	171,00	0,00	134,76	135	134,19	1,00
	171,42	172	172,00	2,00	134,69	135	134,19	0,00
	171,40	171	171,00	1,00	134,64	136	135,18	0,00
	171,38	170	170,00	1,00	134,59	135	134,19	2,00
	171,35	173	173,00	0,00	134,52	136	135,18	0,00
PROMEDIO	171,45	171,5	171,50	1,00	134,74	135,5	134,69	0.50
INCERTID.		0,327	1,198	0,267		0,189	0,886	0,267

MES FEBRERO 2005	DELUXE ISOTOPE							
	CESIO - 137				BARIO - 133			
	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)
	171,32	172	171,66	2,00	134,47	135	134,33	0,00
	171,30	172	171,66	1,00	134,42	135	134,33	0,00
	171,27	171	170,66	2,00	134,35	134	133,33	2,00
	171,25	173	172,65	0,00	134,31	135	134,33	0,00
	171,23	172	171,66	1,00	134,26	135	134,33	0,00
	171,19	171	170,66	0,00	134,19	135	134,33	0,00
	171,17	172	171,66	0,00	134,14	135	134,33	1,00
	171,15	170	169,66	0,00	134,09	135	134,33	0,00
	171,12	172	171,66	2,00	134,02	136	134,33	0,00
	171,70	171	170,66	0,00	133,97	135	134,33	1,00
	171,08	171	170,66	1,00	133,92	135	134,33	0,00
<hr/>								
PROMEDIO	171,25	171,5	171,20	0,818	134,19	134,9	134,23	0,364
INCERTID.		0,247	1,099	0,263		0,091	0,622	0,203

MES MARZO 2005	DELUXE ISOTOPE							
	CESIO - 137				BARIO - 133			
	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)
	171,02	172	171,83	1,00	133,81	136	135,32	0,00
	171,00	171	170,83	0,00	133,76	135	134,33	0,00
	170,97	171	170,83	0,00	133,69	134	133,33	3,00
	170,95	171	170,83	1,00	133,64	134	133,33	0,00
	170,92	171	170,83	0,00	133,59	134	133,33	1,00
	170,89	170	169,83	0,00	133,52	134	133,33	1,00
	170,87	171	170,83	1,00	133,47	134	133,33	0,00
	170,85	172	171,83	0,00	133,43	134	133,33	2,00
	170,82	172	171,83	0,00	133,36	134	133,33	0,00
	170,79	171	170,83	0,00	133,31	134	133,33	0,00
	170,74	170	169,83	1,00	133,19	133	132,34	0,00
<hr/>								
PROMEDIO	170,89	171,1	170,92	0,364	133,52	134,2	133,51	0,667
INCERTID.		0,211	1,002	0,152		0,226	1,029	0,284

MES ABRIL 2005	DELUXE ISOTOPE							
	CESIO - 137				BARIO - 133			
	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)
	170,70	171	170,66	0,00	133,10	134	133,20	0,00
	170,62	171	170,66	0,00	132,93	134	133,20	0,00
	170,59	170	169,66	1,00	132,86	133	132,20	2,00
	170,57	171	170,66	0,00	132,81	134	133,20	0,00
	170,55	171	170,66	1,00	132,77	133	132,30	1,00
	170,51	171	170,66	0,00	132,69	134	133,20	1,00
	170,47	171	170,66	1,00	132,60	133	132,20	0,00
PROMEDIO	170,57	170,9	170,52	0,429	132,82	133,6	132,77	0,571
INCERTID.		0,143	0,793	0,202		0,202	0,877	0,297

MES MAYO 2005	DELUXE ISOTOPE							
	CESIO - 137				BARIO - 133			
	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)
	169,27	171	168,95	1,00	132,32	133	132,20	0,00
	169,24	171	168,95	0,00	132,27	133	132,20	2,00
	169,21	171	168,95	1,00	132,20	133	132,20	1,00
	169,19	171	168,95	1,00	132,15	133	132,20	1,00
	169,12	172	169,94	0,00	131,99	133	132,30	2,00
	169,09	171	168,95	1,00	131,94	133	132,20	1,00
	169,06	171	168,95	1,00	131,87	133	132,20	2,00
	169,04	171	168,95	0,00	131,83	133	132,20	1,00
	169,02	171	168,95	0,00	131,78	132	131,21	1,00
	168,99	171	168,95	1,00	131,71	132	131,21	1,00
PROMEDIO	169,12	171,1	169,05	0,600	132,01	132,8	132,00	1,200
INCERTID.		0,100	0,762	0,163		0,133	0,798	0,200

MES JUNIO 2005	DELUXE ISOTOPE							
	CESIO - 137				BARIO - 133			
	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)
	168,97	171	169,29	1,00	131,71	132	131,60	2,00
	169,94	171	169,29	0,00	131,66	133	132,60	1,00
	168,91	171	169,29	0,00	131,59	133	132,60	1,00
	168,89	170	168,30	2,00	131,55	132	131,60	1,00
	168,87	171	169,29	1,00	131,50	132	131,60	0,00
	168,84	171	169,29	1,00	131,43	132	131,60	0,00
	168,82	170	168,30	0,00	131,38	132	131,60	1,00
	168,80	170	168,30	2,00	131,34	131	130,61	1,00
	168,74	170	168,30	0,00	131,22	131	130,61	0,00
	168,72	170	168,30	1,00	131,17	131	130,61	2,00
	168,69	170	168,30	1,00	131,10	131	130,61	2,00
PROMEDIO	168,85	170,5	168,75	0,818	131,45	131,8	131,42	1,000
INCERTID.		0,157	0,873	0,226		0,226	1,221	0,234

DATOS PTW - FREIBURG CURIEMENTOR 3

MES OCTUBRE 2004	PTW - FREIBURG							
	CESIO - 137				BARIO - 133			
	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)
172,67	157,9	172,87	0,03	137,46	130,8	137,73	0,00	
172,64	157,1	171,98	0,04	137,39	130,2	137,10	0,00	
172,62	157,2	172,10	0,03	137,34	130,6	137,50	0,02	
172,56	157,3	172,22	0,02	137,22	131,0	137,93	0,01	
172,54	158,1	173,11	0,01	137,17	129,8	136,65	0,03	
172,52	157,5	172,45	0,01	137,12	130,4	137,28	0,03	
172,49	157,1	172,02	0,00	137,05	129,9	136,76	0,02	
172,47	157,6	172,54	0,03	137,00	130,1	137,00	0,00	
172,44	157,4	172,30	0,05	136,95	129,8	136,67	0,01	
172,41	158,4	173,45	0,00	136,88	130,0	136,88	0,01	
172,39	157,6	172,57	0,00	136,83	130,0	136,89	0,00	
172,37	157,2	172,11	0,02	136,78	129,9	136,75	0,03	
PROMEDIO	172,54	157,53	172,48	0,020	137,10	130,21	137,10	0,013
INCERTID.		0,120	0,765	0,005		0,116	0,773	0,003

MES NOVIEMBRE 2004	PTW - FREIBURG							
	CESIO - 137				BARIO - 133			
	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)
172,31	157,8	173,38	0,04	136,66	129,8	136,93	0,01	
172,29	156,2	171,62	0,04	136,61	129,5	136,61	0,01	
172,26	157,2	172,73	0,03	136,54	129,9	137,02	0,02	
172,24	156,6	172,08	0,02	136,49	129,7	136,82	0,01	
172,22	157,1	172,63	0,02	136,44	129,0	136,06	0,03	
172,18	156,7	172,21	0,00	136,37	129,2	136,27	0,03	
172,16	156,7	172,18	0,03	136,32	129,2	136,26	0,04	
172,14	156,7	172,20	0,01	136,27	129,6	136,70	0,03	
172,11	156,4	171,88	0,00	136,20	129,1	136,17	0,03	
172,09	156,1	171,54	0,01	136,15	129,1	136,18	0,02	
172,06	156,9	172,43	0,00	136,10	128,8	135,86	0,02	
172,03	156,6	172,10	0,00	136,03	128,8	135,86	0,02	
PROMEDIO	172,17	156,75	172,25	0,017	136,35	129,31	136,40	0,023
INCERTID.		0,133	0,794	0,004		0,110	0,760	0,003

MES DICIEMBRE 2004	PTW - FREIBURG							
	CESIO - 137				BARIO - 133			
	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)
	172,01	156,9	173,05	0,01	135,98	129,1	136,44	0,02
	171,99	155,9	171,92	0,03	135,94	128,7	136,03	0,01
	171,95	156,5	172,62	0,00	135,86	128,5	135,80	0,02
	171,91	155,9	171,95	0,01	135,77	128,5	135,80	0,02
	171,88	156,0	172,07	0,00	135,69	128,6	135,91	0,02
	171,80	156,3	172,33	0,06	135,53	128,8	136,08	0,06
	171,78	155,1	170,84	0,21	135,48	127,8	134,94	0,14
	171,73	154,8	170,73	0,01	135,36	127,8	135,06	0,02
	171,70	155,8	171,83	0,02	135,31	127,4	134,63	0,03
PROMEDIO	171,86	155,91	171,93	0,039	135,66	128,36	135,63	0,038
INCERTID.		0,217	0,935	0,022		0,186	0,872	0,014

MES ENERO 2005	PTW - FREIBURG							
	CESIO - 137				BARIO - 133			
	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)
	171,55	155,6	172,33	0,07	134,97	127,2	135,02	0,06
	171,53	154,9	171,52	0,10	134,93	127,1	134,90	0,08
	171,48	155,3	171,73	0,17	134,81	127,1	134,80	0,10
	171,45	154,8	171,15	0,16	134,76	127,1	134,76	0,13
	171,42	155,1	171,64	0,19	134,69	126,7	134,41	0,14
	171,40	154,4	170,80	0,13	134,64	126,9	134,60	0,16
	171,38	154,9	171,34	0,15	134,59	127,0	134,69	0,12
	171,35	155,0	171,58	0,14	134,52	126,8	134,50	0,09
PROMEDIO	171,45	155,00	171,51	0,14	134,74	126,99	134,71	0,110
INCERTID.		0,125	0,731	0,014		0,061	0,661	0,012

MES FEBRERO 2005	PTW - FREIBURG							
	CESIO - 137				BARIO - 133			
	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)
	171,32	155,0	171,70	0,18	134,47	126,4	134,63	0,11
	171,30	154,9	171,58	0,18	134,42	126,1	134,29	0,12
	171,27	155,0	171,72	0,16	134,35	126,2	134,38	0,14
	171,25	154,7	171,43	0,12	134,31	126,5	134,75	0,09
	171,23	155,0	171,74	0,14	134,26	126,2	134,44	0,08
	171,19	154,4	171,12	0,10	134,19	125,9	134,11	0,09
	171,17	154,6	171,33	0,11	134,14	126,2	134,43	0,09
	171,15	154,8	171,53	0,13	134,09	125,8	134,01	0,09
	171,12	154,3	170,99	0,12	134,02	125,7	133,91	0,08
	171,10	153,6	170,20	0,13	133,97	125,6	133,80	0,08
	171,08	154,4	171,15	0,07	133,92	125,3	133,48	0,08
	171,06	153,9	170,65	0,10				
PROMEDIO	171,19	154,55	171,26	0,131	134,19	125,99	134,20	0,095
INCERTID.		0,131	0,775	0,010		0,110	0,736	0,006

MES MARZO 2005	PTW - FREIBURG							
	CESIO - 137				BARIO - 133			
	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)
	171,02	154,7	172,06	0,11	133,81	125,3	133,62	0,07
	171,00	154,0	171,30	0,09	133,76	125,5	133,86	0,05
	170,97	153,4	170,71	0,02	133,69	125,4	133,79	0,01
	170,95	154,1	171,50	0,01	133,64	125,3	133,65	0,04
	170,92	153,2	170,43	0,07	133,59	125,1	133,42	0,06
	170,89	153,8	171,08	0,09	133,52	125,6	133,93	0,08
	170,87	153,6	170,92	0,03	133,47	125,1	133,46	0,02
	170,85	154,1	171,46	0,05	133,43	125,3	133,66	0,03
	170,82	153,4	170,66	0,07	133,36	124,9	133,23	0,04
	170,79	153,6	170,96	0,00	133,31	125,0	133,38	0,00
	170,74	152,7	169,96	0,04	133,19	124,5	132,82	0,02
	170,72	152,6	169,84	0,00				
PROMEDIO	170,88	153,60	170,91	0,05	133,81	125,18	133,53	0,04
INCERTID.		0,173	0,879	0,011		0,093	0,704	0,008

MES ABRIL 2005	PTW - FREIBURG							
	CESIO - 137				BARIO - 133			
	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)
	170,70	154,1	171,47	0,04	133,10	124,3	132,98	0,02
	170,60	152,9	170,18	0,00	132,93	124,1	132,77	0,00
	170,62	153,5	170,80	0,04	132,86	124,2	132,89	0,02
	170,59	153,2	170,51	0,00	132,81	123,6	132,22	0,00
	170,57	153,8	171,12	0,05	132,77	124,4	133,08	0,03
	170,55	153,2	170,46	0,05	132,69	124,4	133,08	0,03
	170,51	152,9	170,13	0,04	132,60	124,1	132,78	0,03
	170,47	152,7	169,94	0,01				
PROMEDIO	170,58	153,29	170,58	0,029	132,82	124,16	132,83	0,018
INCERTID.		0,171	0,800	0,008		0,104	0,690	0,005

MES MAYO 2005	PTW - FREIBURG							
	CESIO - 137				BARIO - 133			
	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)
	169,27	151,7	168,63	0,05	132,32	123,0	131,95	0,03
	169,24	152,6	169,67	0,02	132,27	123,2	132,18	0,01
	169,21	152,4	169,46	0,01	132,20	124,0	133,05	0,00
	169,19	151,6	168,58	0,00	132,15	123,1	132,09	0,00
	169,12	151,4	168,35	0,01	131,99	123,0	131,98	0,00
	169,09	152,8	169,91	0,00	131,94	122,7	131,66	0,00
	169,06	152,0	168,99	0,03	131,87	123,1	132,06	0,02
	169,04	153,1	170,21	0,03	131,83	122,9	131,85	0,02
	169,02	152,8	169,89	0,02	131,78	122,7	131,65	0,01
	168,99	150,9	167,79	0,00	131,71	122,7	131,65	0,00
PROMEDIO	169,12	152,13	169,15	0,017	132,01	123,04	132,01	0,009
INCERTID.		0,228	0,982	0,005		0,121	0,736	0,003

MES JUNIO 2005	PTW - FREIBURG							
	CESIO - 137				BARIO - 133			
	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)	D.REFER. (μ Ci)	D.EXP. (μ Ci)	D.CORREG. (μ Ci)	FONDO (μ Ci)
	168,97	152,3	170,22	0,05	131,71	121,6	130,93	0,03
	168,94	150,4	168,10	0,04	131,66	122,1	131,47	0,03
	168,91	151,4	169,22	0,04	131,59	122,4	131,76	0,06
	168,89	151,6	169,44	0,04	131,55	122,2	131,58	0,03
	168,87	151,0	168,77	0,04	131,50	122,6	132,01	0,03
	168,84	150,6	168,35	0,02	131,43	122,3	131,71	0,01
	168,82	150,3	168,04	0,00	131,38	122,1	131,50	0,00
	168,80	150,2	167,91	0,01	131,34	122,5	131,92	0,01
	168,74	151,5	169,32	0,05	131,22	121,6	130,93	0,03
	168,72	150,7	168,45	0,03	131,17	121,5	130,83	0,02
	168,69	151,8	169,68	0,03	131,10	122,0	131,39	0,00
PROMEDIO	168,85	151,07	168,86	0,010	131,45	122,08	131,46	0,010
INCERTID.		0,208	0,948	0,005		0,113	0,730	0,005

E. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] IAEA-TECDOC-602/S, "Control de Calidad de los Instrumentos de Medicina Nuclear, 1991", Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA, Viena, 1996.
- [2] M. L. De Cabrejas, C. Signoretta, R. Rodríguez Pasqués, C. Magnavacca, "Calibradores de Actividad", CNEA – AC 12/86. Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, 1986.
- [3] Sociedad Española de Física Médica, Sociedad Española de Medicina Nuclear y Sociedad Española de Protección Radiológica. "Protocolo Nacional de Control de Calidad en la Instrumentación en Medicina Nuclear", 1999.
- [4] G. T. Eduardo, " Protocolo de Control de Calidad en Medicina Nuclear ", LMRI, Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes, España, 2001.
- [5] CEM / ISO 98, "Guía para la expresión de la incertidumbre de medida". (Versión Española de la Guía ISO). Ministerio de Fomento. Centro Español de Metrología, 1998.
- [6] Miguel Cantero, " Programa de Control de Calidad en Calibradores de dosis", Revista de Radiobiología y Medicina Física, Universidad de Málaga, España, 2004.
- [7] O.I.E.A. Programa Asistido de Capacitación para Tecnólogos en Medicina Nuclear. 2000.
- [8] M. Levi de Cabrejas y R. C. de Cabrejas, " Instrumentación en Medicina Nuclear ", VI Congreso Regional sobre Seguridad Radiológica y Nuclear, Lima, 2003.
- [9] James A. Sorenson, Ph. D. Physics in Nuclear Medicine. Second Edition. 1987.
- [10] Operating Instructions, Deluxe Isotope Calibrator II, Model 34-056, Victoreen, Florida.

- [11] Manual Curiementor $\beta\gamma$ Type 12001, 12003 PTW – FREIBURG, Germany.
- [12] Certificate of Radioactivity Calibration, Cesium-137 and Barium-133 Reference Source, ANSI standard N542-1977, 1994.
- [13] Wayne W. Daniel. Applied Nonparametric Statistics. Editorial Houhton Miffin Company. 1980.
- [14] Michael E. Phelps, Ph. D. Physics in Nuclear Medicine. Second Edition. 1989.
- [15] Quality Control of Nuclear Medicine Instruments. IAEA-TECDOC 317. Viena, 1984.
- [16] Quality Control of Dose Calibrator. Jan, A.N., and M. Abdul Rahman. Nuclear Medicine XX: 247. 1981.
- [17] Barry N. Taylor and Chris E. Kuyatt. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results. 1994 Edition.

F. APÉNDICE

F1. TABLA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS RADIONUCLIDOS MAS USADOS EN MEDICINA NUCLEAR

Radio núclido	Modo de Desintegración	T _½	Emisiones g		Actividades Típicas administradas (MBq)	
			Energía (KeV)	Número de fotones por 100 desintegraciones	Diagnóstico	Terapia
¹¹ C	β ⁺	20,38 min	511	200	150 - 370	
¹³ N	β ⁺	9,965 min	511	200	150 - 370	
¹⁵ O	β ⁺	2,037 min	511	200	150 - 370	
¹⁸ F	β ⁺ , c.e.	1,829 h	511	196	150 - 370	
⁵¹ Cr	c.e.	27,70 días	320,1	9,8	3, 7 - 5	
⁶⁷ Ga	c.e.	78,3 h	91,3 93,3 184,6 209,0 300,2 393,5	3,2 39 21,3 2,4 16,7 4,6	185 - 370	
^{99m} Tc	γ	6,007 h	140,5	89,7	37 - 1110	
¹¹¹ In	c.e.	2,805 días	171,3 245,3	90,2 94	185 - 370	
¹²³ I	c.e.	13,27 h	~ 27,4 ~ 31 158,97	61 16 83	111 - 185	
¹²⁵ I	c.e.	59,9 días	~ 27,4 ~ 31 35,49	113 25,6 6,7	1, 5 - 2	
¹³¹ I	β ⁻	8,021 días	80,2 284,3 364,5 637,0 722,9	2,6 6,2 81,6 7,1 1,8	10 - 222	185 - 7400
¹⁵³ Sm	β ⁻	46,28 h	~ 41,5 47 69,7 103,2	49 12 5,3 28,3		1850 - 3700
²⁰¹ Tl	c.e.	72,91 h	11,5 ~ 70 79,8 82,4 165,3 167,4	45 74 16,4 4,6 2,7 10,3	74 - 185	

Radio núclido	Modo de Desintegración	T _{1/2}	Energía b ⁻ máxima (KeV)	Número de b ⁻ por 100 desintegraciones	Actividades Típicas administradas (MBq) Terapia
³² P	β ⁻	14,28 días	1710,4	100	148 - 222
⁸⁹ Sr	β ⁻	50,65 días	1495,1	99,99	111 - 185
⁹⁰ Y	β ⁻	2,671 días	2280	99,98	185 - 220
¹⁸⁶ Re	β ⁻	3,775 días	939,4 1076,6	21,5 71,6	74 - 1295

**F2. TABLA DE DECAIMIENTO DE LOS RADIONÚCLIDOS MÁS USADOS
EN EL DEPARTAMENTO DE MEDICINA NUCLEAR – INEN.**

Tc - 99m	
T 1/2 (horas) = 6,000	
Tiempo (horas)	Factor de Decaimiento
0	1,0000
3	0,7072
6	0,5001
9	0,3536
12	0,2501
24	0,0625
36	0,0156
48	0,0039

I - 131	
T 1/2 (días) = 8,000	
Tiempo (días)	Factor de Decaimiento
0	1,0000
2	0,8409
4	0,7072
6	0,5947
8	0,5001
10	0,4205
12	0,3536
14	0,2974

Ga - 67	
T 1/2 (horas) = 78,3	
Tiempo (horas)	Factor de Decaimiento
0	1,0000
3	0,9738
6	0,9483
9	0,9234
12	0,8992
24	0,8086
36	0,7272
48	0,6539

Sm - 153	
T 1/2 (horas) = 46,7	
Tiempo (horas)	Factor de Decaimiento
0	1,0000
3	0,9566
6	0,9148
9	0,8750
12	0,8369
24	0,7004
36	0,5861
48	0,4906

F3.TABLA DE LAS ACTIVIDADES SUMINISTRADAS DE LOS RADIONÚCLIDOS MAS USADOS EN EL DEPARTAMENTO DE MEDICINA NUCLEAR – INEN

ESTUDIO	NUCLIDO	FORMA	VIA	ACTIVIDAD (mCi)
CENTELLOGRAMA OSEO	Tc-99m	FOSFONATO	INTRAVENOSA	16 – 25
GFR	Tc-99m	DTPA	INTRAVENOSA	2 – 3
GATILLADO CARDÍACO (GHPS)	Tc-99m	GLÓBULOS	INTRAVENOSA	25 – 30
HEPATOBILIAR	Tc-99m	HIDA	INTRAVENOSA	5 – 8
ABSCESO INFECCIOSO	Ga-67	CITRATO	INTRAVENOSA	4 – 5
SHUNT L/R	Tc-99m	MAA	INTRAVENOSA	2 – 3
HÍGADO/BAZO	Tc-99m	COLOIDE	INTRAVENOSA	5 – 6
PERFUSIÓN PULMONAR	Tc-99m	MAA	INTRAVENOSA	4 – 6
MIOCARDIO PERFUSIÓN	Tc-99m	MIBI	INTRAVENOSA	16 – 20
PARATIROIDES	Tc-99m	MIBI	INTRAVENOSA	16 – 20
CENTELLOGRAFÍA RENAL	Tc-99m	DMSA	INTRAVENOSA	2 – 3
TIROIDES	Tc-99m	PERTECNONATO	INTRAVENOSA	3 – 4
RASTREO DE CUERPO ENTERO	I-131	ORAL	INTRAVENOSA	3 – 5